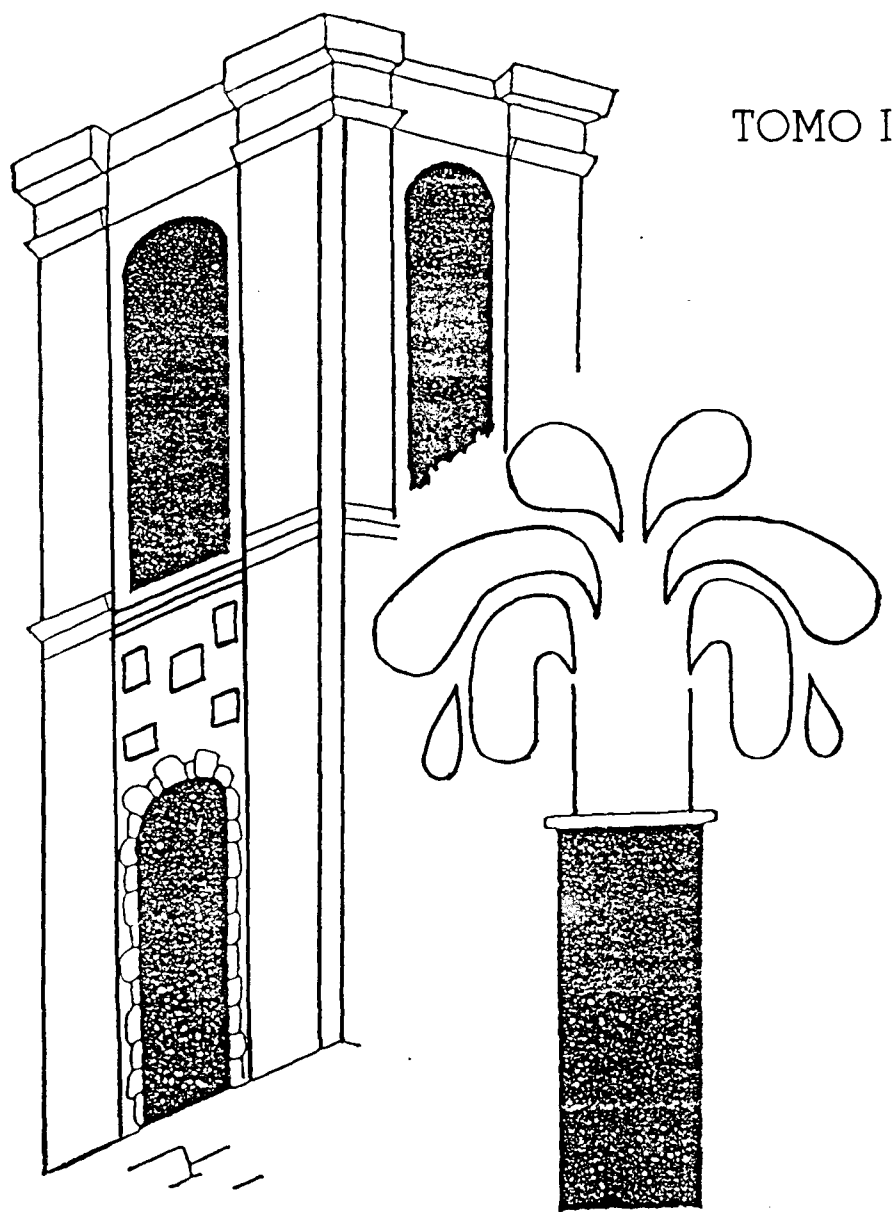


# II Curso Hidrogeológico de Almadén

---

Del 14 al 26 de Abril de 1986



ORGANIZA:

ESCUELA UNIVERSITARIA POLITECNICA DE ALMADEN

Universidad Castilla · La Mancha

UNIVERSIDAD DE CASTILLA-LA MANCHA

ESCUELA UNIVERSITARIA POLITECNICA DE ALMADEN

II CURSO HIDROGEOLOGICO

DE ALMADEN

14 al 26 de Abril de 1.986

## EN MEMORIA DE CARLOS RUIZ CELAA

Un miércoles de Mayo, -  
Antonio Piñero y Pepe Murillo nos-  
dieron la triste noticia, tu coche-  
había aparecido despeñado en un cami-  
no, próximo a Socuellamos, por el que  
acudías a inspeccionar un sondeo. Tu  
fallecimiento nos llenó de sobresal-  
to, la tarde anterior habías estado-  
con nosotros, impartiendo tus clases  
en el Curso de Hidrogeología de Alma-  
dén. Siempre nos ayudaste de forma -  
desinteresada a dar un servicio cien-  
tífico al alumnado, desde el primer-  
momento buscaste tiempo para colabo-  
rar con esta casa y desde ella no te  
nemos palabras suficientes para expre-  
sar nuestros sentimientos. Eras uno -  
de los mejores profesionales de las -  
aguas subterráneas, estudiaste los --  
acuíferos manchegos y Las Tablas de -  
Daimiel, organizaste los regadíos de-  
Albacete y nos diste tus conocimien-  
tos, ahora ya sólo nos queda tu sonri-  
sa eterna desde el cielo.

Agradecemos a ALFREDO IGLESIAS LOPEZ las gestiones, asesoramiento y ayudas que posibilitaron la puesta en marcha de los Cursos Hidrogeológicos de Almadén.

RELACION DE PARTICIPANTES:

- Almansa Rodriguez, Emiliano	Prof. E.U.P.A.
- Arenas , Luis	Ing. Téc. Minas
- Diaz Trenado, Ricardo	Ing. Téc. Minas
- Fernandez Cantón, Claudio	(3º Laboreo)
- Fernandez Mejias, José Felix	Minas de Almadèn
- Gallego-Preciados Algora, Juan M.	Ing. Téc. Minas
- Gonzalez , Rafael	Ing. Téc. Minas
- Guijas Rayo, Juan Antonio	(3º Laboreo)
- Engono Bengono, Diosdado	(3º Combusti.)
- Hornero Diaz, Jorge Enrique	(3º Sondeos)
- León García, Valentín	(3º Sondeos)
- Martín de la Vega Bermejo, José L.	(3º Laboreo)
- Martinez Rodrigo, María Belen	Ing. Téc. Minas
- Moyo Osorio, Justo	Ing. Téc. Minas
- Muñoz Moreno, Fernando	(3º Laboreo)
- Parra Salmeron, Rafael	Prof. Geol. Min.
	de Linares.
- Ramón Viola, Juan Antonio	(3º Laboreo)
- De la Rocha Ferrero, Gustavo	(3º Laboreo)
- Rodriguez Rubio, Miguel Angel	E. T. S. Minas de
	Madrid.
- Roncero Medina, Francisca	Ing. Téc. Minas
- Sabariegos Nuñez, Lázaro	(2º Minas)
- Salgado Rodriguez, Manuel	(3º Sondeos)
- Vera Anillo, Juan Pedro	(3º Laboreo)
- Victoria Torregrosa, Juan Antonio	(3º Laboreo)
- Villalba Arranz, Santiago	(3º Laboreo)

DIRECTOR DEL CURSO:

- Prof. D. Octavio Puche Riart

SECRETARIO Y SUBDIRECTOR DEL CURSO:

- Prof. D. Luis Mansilla Plaza

ORGANIZACION:

- Cátedras de Geología e Investigación Minera.  
E.U.P.A. Universidad de Castilla-La Mancha.
- En colaboración con la División de Aguas Subterráneas del I.G.M.E.
- Bajo el patrocinio de la Universidad de Castilla-La Mancha.

LUGAR DE CELEBRACION:

- Sala de conferencias de la Escuela Universitaria - Politécnica de Almadén, C/ Manuel Meca nº1, Almadén, (Ciudad Real).

FECHAS:

- 14 al 26 de Abril de 1986.

INSCRIPCION:

- En la secretaria del centro
- O bien, en los despachos de las cátedras de Geología e Investigación Minera.

## PRESENTACION:

- En los últimos años el porcentaje de aguas subterráneas empleado para satisfacer las necesidades del hombre ha sufrido un notable crecimiento, sobre todo en agua potable.

Este aumento del consumo ha sido fundamental para el desarrollo económico de Castilla-La Mancha, poniendo de manifiesto parte del potencial agropecuario e industrial que disponemos. No obstante, los años de sequía han venido a ensombrecer un poco el panorama, ha surgido la preocupación por el abastecimiento a los núcleos urbanos y el hombre se ha visto obligado a una explotación irracional de los acuíferos, desconociendo en muchos casos la disposición del yacimiento, así como los mecanismos de circulación, conexión con otros sistemas hidráulicos o los métodos de investigación y protección de los acuíferos.

Todo esto nos obliga a formar técnicos en las disciplinas relacionadas con la Hidrogeología que tanta demanda tienen en los foros internacionales.

## OBJETIVOS:

- Este curso se ha organizado con los fines de:
- Conseguir que los alumnos adquieran, fundamentalmente, una formación eminentemente teórico-práctica, indispensable para que complementen los conocimientos básicos necesarios adquiridos en los centros de enseñanza.
- Completar la formación, en aras de conseguir una capacitación más integral, de aquellos técnicos que sin dedicarse de lleno a la Hidrogeología necesitan, por la índole de su trabajo, adquirir los conocimientos impartidos en el curso.

# I N D I C E =====

	<u>pag.</u>
- "Los recursos hidrogeológicos de Castilla La Mancha "	
Octavio Puche Riart.....	9
- "Parámetros hidrogeológicos".	
Octavio Puche Riart .....	37
- "Diagrafías".	
Luis Mansilla Plaza .....	53
- "Sistemas de información en hidrogeología".	
Antonio Garzon López. ....	75
- "Modelos digitales en hidrogeología".	
Francisco Javier Elorza Tenreiro. ....	101
- "Hidroquímica".	
Margarita Gómez Sánchez. ....	126
- "Hidrometría".	
Fernando Terán Sierra .....	172
- "Perforación a percusión".	
Jesús Candil Gonzalo. ....	201
- "Perforación a rotopercusión".	
Jesús Candil Gonzalo. ....	216
- "Perforación a rotación con circulación inversa".	
Pedro Layna Sanz. ....	261
- "Desarrollo y tratamientos en rocas no consolidadas".	
Carlos Ruiz Celaá. ....	290
- "Desarrollo de captaciones de aguas Subterráneas me- diante utilización de hielo seco".	
Carlos Ruiz Celaá. ....	295
- "Desarrollo y acabado de sondeos: Acidificación".	
Carlos Ruiz Celaá. ....	305
- "Dimensionado de grava para sondeos en formaciones - acuíferas arenosas".	
Carlos Ruiz Celaá. ....	312
- "Introducción a la evaluación de pozos y acuíferos - mediante ensayos de bombeo".	
Manuel Villanueva Martinez y Alfredo Iglesias López	314



- "Legislación de aguas".	<u>Pag.</u>
José Maria Catalan. ....	358
- "Tratamiento de aguas residuales en mine <u>ría</u> ".	
José María Catalán. ....	374
- "Problemas del agua en la minería".	
José M <sup>a</sup> Iraizoz Fernandez. ....	386

#### APENDICE

- "Balances hídricos".	
Lázaro Sánchez Castillo. ....	406
- "Cartografía hidrogeológica".	
Lázaro Sánchez Castillo. ....	422
- "Formularios de Prácticas para los análi <u>s</u> is de ensayos de Bombeos".	
Carlos Riestra Fuertes. ....	455

RELACION DE CONFERENCIAS:

- Lunes 14 de Abril a las 18 horas:  
PRESENTACION DEL CURSO  
D. Octavio Puche Riart. Ingeniero de Minas. Prof. --  
Tit. de Geología. E.U.P.A.
- Lunes 14 de Abril a las 18 horas 30 minutos:  
CONFERENCIA INAGURAL: LOS ACUIFEROS DE LAS ROCAS IG  
NEAS.  
D. Rafael Hernando Luna. Dtor. de la E.U.I.T. Minera  
de Belmez.
- Lunes 14 de Abril a las 19 horas 30 minutos:  
RECURSOS HIDRICOS DE CASTILLA-LA MANCHA  
D. Octavio Puche Riart.
- Martes 15 de Abril a las 18 horas  
PARAMETROS HIDROGEOLOGICOS  
D. Octavio Puche Riart.
- Martes 15 de Abril a las 19,30:  
ELABORACION DE BALANCES HIDRICOS  
D. Lázaro Sanchez Castillo. Ingeniero Técnico de Mi  
nas.
- Miercoles 16 de Abril a las 18 horas:  
PROSPECCION GEOFISICA APLICADA A LA HIDROGEOLOGIA  
D. Juan Luis Plata Torres. Dr. Ingeniero de Minas.  
Prof. de Geofísica en la E.T.S. de Ingenieros de Mi  
nas de Madrid.
- Miercoles 16 de Abril a las 19 horas 30 minutos:  
DIAGRAFIAS EN HIDROGEOLOGIA  
D. Luis <sup>M</sup>ansilla Plaza. Ingeniero Técnico de Minas.  
Prof. Investigación Minera. E.U.P.A.

- Jueves 17 de Abril a las 18 horas:  
SISTEMAS DE INFORMACION EN HIDROGEOLOGIA  
D. Antonio Garzón López. Ingeniero de Minas. Prof.  
E.T.S. de Ingenieros Minas de Madrid.
- Jueves 17 de Abril a las 19 horas 30 minutos:  
MODELOS DIGITALES EN HIDROGEOLOGIA  
D. Javier Elorza Tenreiro. Dr. Ingeniero de Minas.  
Prof. E.T.S. ingenieros de Minas de Madrid.
- Viernes 18 de Abril a las 18 horas:  
HIDROQUIMICA  
Dña. Margarita Gómez Sánchez. Geólogo. Div. de Aguas  
del I.G.M.E.
- Viernes 19 de Abril a las 19 horas 30 minutos:  
LA CONTAMINACION DE LAS AGUAS  
D. Angel Pérez Martínez. Químico. Prof. Análisis --  
Químico. E.U.P.A.
- Sabado 19 de Abril a las 10 horas:  
PRACTICAS DE ANALISIS DE AGUAS  
D. Angel Pérez Martínez.
- Sabado 19 de Abril a las 11 horas:  
AFOROS  
D. Fernando Terán Sierra. Ingeniero de Minas. Prof.  
Mecánica de Fluidos. E.U.P.A.
- Sabado 19 de Abril a las 12 horas:  
PRACTICAS DE AFORO CON MOLINETE  
D. Fernando terán Sierra.

- Lunes 21 de Abril a las 18 horas:  
PERFORACION DE POZOS: PERCUSION Y ROTOPERCUSION  
D. Jesús Candil. Ingeniero de Minas. Div. de Aguas  
del I.G.M.E.
- Lunes 21 de Abril a las 19 horas 30 minutos:  
PERFORACION CON CIRCULACION DIRECTA E INVERSA  
D. Pedro Layna Sanz. Ingeniero Técnico de Minas. --  
Div. Aguas del I.G.M.E.
- Martes 22 de Abril a las 18 horas:  
EQUIPAMIENTO DEL SONDEO  
D. Luis Mansilla Plaza
- Martes 22 de Abril a las 19 horas 30 minutos:  
TRATAMIENTO DE LOS SONDEOS  
D. Carlos Ruiz Celaá. Ingeniero de Minas. División  
de Aguas del I.G.M.E.
- Miercoles 23 de Abril a las 16 horas:  
ENSAYOS DE BOMBEO: INTRODUCCION  
D. Alfredo Iglesias. Ingeniero de Minas. Div. Aguas  
I.G.M.E.
- Miercoles 23 de Abril a las 17 horas:  
ENSAYOS EN REGIMEN PERMANENTE Y VARIABLE  
D. Carlos Riestra/ Ingeniero de Minas. Div. Aguas -  
I.G.M.E.
- Miercoles 23 de Abril a las 19 horas:  
ENSAYOS DE BOMBEO EN CASOS PARTICULARES  
D. Alfredo Iglesias López.
- Miercoles 23 a las 20 horas:  
DIMENSIONADO DE FILTROS Y EMPAQUES  
D. Carlos Riestra.

- Jueves 24 de Abril a las 18 horas:  
ELABORACION DE LA CARTOGRAFIA HIDROGEOLOGICA  
D. Lázaro Sanchez Castillo.
- Jueves 24 de Abril a las 19 horas:  
LEGISLACION DE AGUAS  
D. José Maria Catalan. Colaborador E.T.S.Ingenieros  
Minas de Madrid
- Jueves 24 de Abril a las 20 horas:  
CONTAMINACION DE LAS AGUAS EN MINERIA  
D. José Maria Catalan.
  
- Viernes 25 de Abril a las 18 horas:  
PROBLEMAS DEL AGUA EN LA MINERIA  
D. José Maria Iraizoz Fernandez. Ingeniero de Minas  
Prof. de Laboreo. E.U.P.A.
- Viernes 25 de Abril a las 19 horas 30 minutos:  
MESA REDONDA  
ENTREGA DE DIPLOMAS

LOS RECURSOS HIDROGEOLOGICOS

DE CASTILLA - LA MANCHA

Octavio Puche Riart

Marzo 1.986

## 1. INTRODUCCION

Castilla-La Mancha es una de las regiones españolas con menor renta per cápita, por eso la Administración debe potenciar su desarrollo y los organismos científicos tienen que aportar soluciones.

Para cualquier programación de medidas que traten de mejorar nuestro nivel de vida hay que conocer exhaustivamente los recursos disponibles y su posibilidad de explotación, así como la situación de los mercados y las vías de comunicación, tanto de la región como de las zonas colindantes.

Dentro de los recursos naturales, el agua ocupa un lugar - importante ya que va a incidir directamente en los tres sectores básicos de la vida económica. Hay que dotar a los núcleos urbanos los caudales y las calidades pertinentes. Hay que desarrollar y controlar los regadíos. Y, por último, hay que suministrar el preciado -- elemento a la industria.

## 2. CONTEXTO GEOGRAFICO Y SOCIOECONOMICO

Castilla-La Mancha tiene una superficie de 80.000 Km<sup>2</sup>, algo menos de la sexta parte de España; por otro lado, la población - es de 1.650.000 personas, algo más del 4% del total de la nación, - existiendo algunas zonas, como la de Almadén, donde no se sobrepasa la cifra de 1 habitante por Km<sup>2</sup>

Los asentamientos urbanos son fundamentalmente de tipo rural, de los 900 municipios existentes el 93 % tienen menos de 5.000 habitantes, observándose un importante proceso emigratorio y un envejecimiento progresivo de la población.

La economía es fundamentalmente agropecuaria, estando los sectores industrial y servicios poco desarrollados.

Los pueblos aparecen distanciados y conectados entre sí - por una red viaria de mala calidad, pese a que la región es atravesada por tres carreteras nacionales. El desarrollo de las comunicaciones no sería excesivamente costoso ya que en la meseta submeri--

dional existen numerosas llanuras tales como La Mancha, Las Alca---  
rrias, Mesa de Ocaña, Campo de Montiel o campo de Calatrava, donde  
es más fácil el trazado de caminos.

### 3. RECURSOS HIDRICOS

Salvo en los sistemas ibérico y central, en los bordes del territorio autonómico, las precipitaciones son escasas, oscilando - entre los 400 y 600 mm/año, siendo en algunos casos inferior a los - 400 mm, como ocurre en la zona de Hellín, donde tenemos una tenden- cia importante a la desertización. En Almadén, la precipitación me- dia anual ronda en torno a los 520 mm.

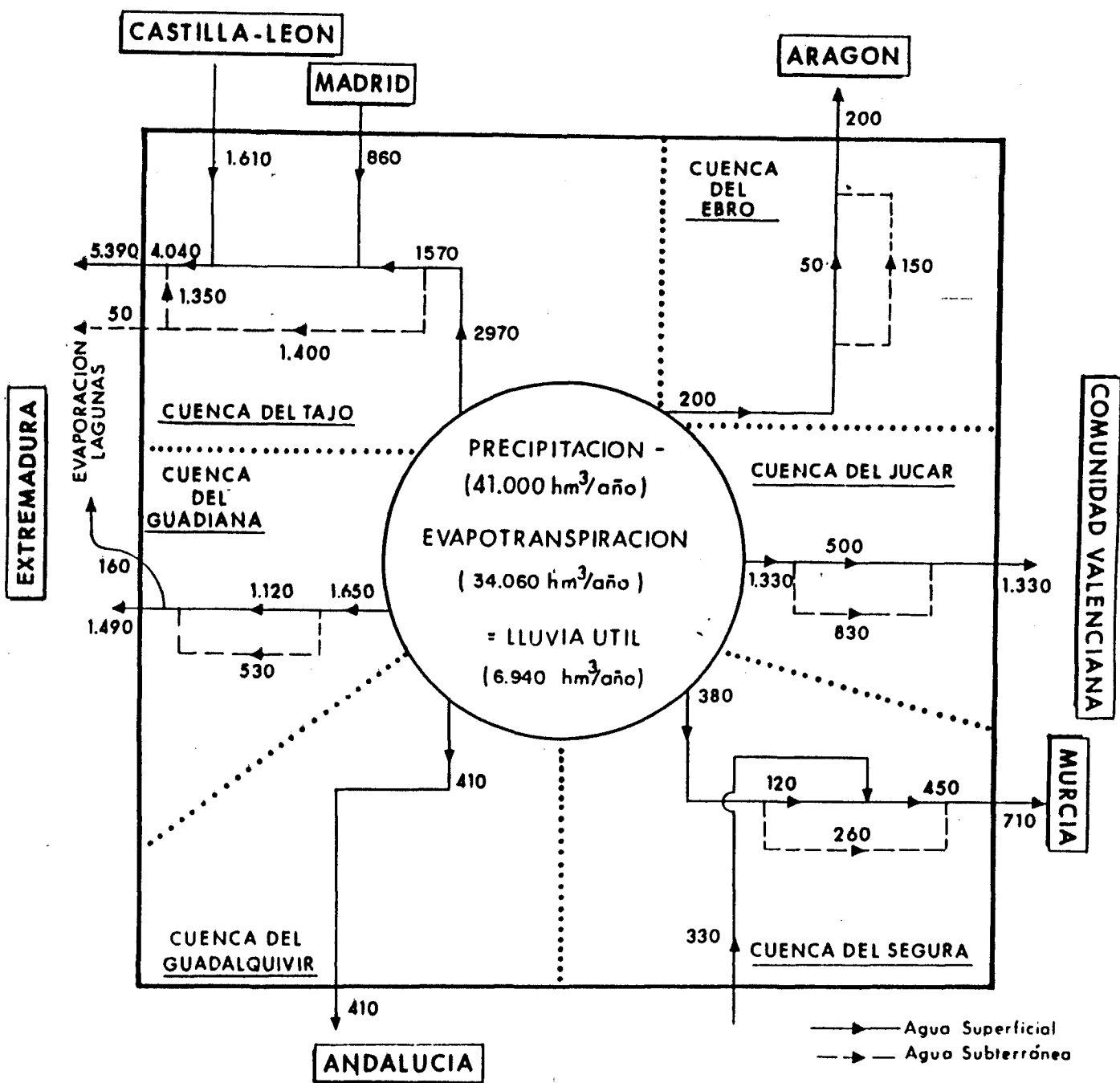
En total, los caudales pluviométricos aportados alcanzan la cifra de 41.000 hm<sup>3</sup>/año, de ellos 34.060 hm<sup>3</sup>/año retornan a la - atmósfera, quedando 6.940 hm<sup>3</sup>/año como caudales útiles.

A estos 6.940 hm<sup>3</sup> anuales generados en la comunidad autó- noma hay que unir 2.800 hm<sup>3</sup> procedentes de las regiones colindantes, principalmente de Madrid y, el resto, de Castilla-León, así como de Andalucía.

La lluvia útil se distribuye por las seis cuencas que in- tegrar el territorio, Tajo, Guadiana, Jucar, Segura, Guadialquivir, y Ebro, nutriendo ríos y acuíferos. (fig. 1)



Fig.-1: **BALANCE HIDRICO EN CASTILLA-LA MANCHA**  
(REGIMEN NATURAL)



LLUVIA UTIL EN LA C.A = ESCORRENTIA SUPERFICIAL + ESCORRENTIA SUBTERRANEA  
(6.940 hm<sup>3</sup>/año) (3.780 hm<sup>3</sup>/año) (3.160 hm<sup>3</sup>/año)

RECURSOS GENERADOS EN LA C.A + APORTACIONES DE OTRAS CC.AA = SALIDAS A OTRAS CC.AA  
(6.940 hm<sup>3</sup>/año) (2.800 hm<sup>3</sup>/año) (9.740 hm<sup>3</sup>/año)



#### 4. UBICACION DE LOS RECURSOS

##### 4.1. Encuadre geológico

Los terrenos antiguos están formados, fundamentalmente, por esquistos y grauvacas, precambrianas y cambrianas. Debido a la orogenia sárdica se muestran discordantes, sobre ellos, el resto de los Sistemas del paleozoico, hasta el carbonífero. Los diversos pisos de la Era Primaria están litológicamente formados por cuarcitas, areniscas, esquistos y pizarras

Coincidente con la orogenia caledoniana aparece un importante vulcanismo en la región de Almadén y coincidente con la orogenia herciniana aparecen granitos, fundamentalmente en los Montes de Toledo y Sistema Central, así como en Sierra Nevada, generando en casos neises y migmatitas,

Precámbrico y Paleozoico se localizan en el Macizo Hespérico, formando en general, por los terrenos constituyentes de la zona norte y occidental del territorio, aunque también aflora algo en la Cordillera Ibérica, cubriendo más de la cuarta parte de Castilla-La Mancha.

El Mesozoico aparece en los flancos del Macizo Hespérico por su extremo oriental, recubriendo fundamentalmente el este y sureste de la comunidad. Las litologías más abundantes son calizas, dolomías, areniscas, margas, arcillas, yesos y conglomerados. Estos niveles fueron plegados y fracturados por la orogenia alpina.

El cenozoico se dispone en la mayor parte de las ocasiones horizontalmente sobre los terrenos de las Eras anteriores, rellenando las cuencas que bordeaban las cordilleras antiguas y constituyendo las extensas llanuras que cubren la parte central de la región. Las litologías más abundantes son calizas, arcillas, areniscas, yesos y margas.

Los terrenos pliocuaternarios se caracterizan por recubrir grandes extensiones del terciario y parte del secundario, mediante una fina capa de limos, arcillas, arenas y gravas. En la

parte occidental, la raña se asienta sobre el paleozoico, no superando nunca los 30 m. de potencia. Por otro lado, en los valles fluviales aparecen depósitos aluviales, adquiriendo en ocasiones, cierta importancia. Por último, reseñaremos la existencia de un vulcanismo básico, en el Campo de Calatrava, constituido por lapilli, cenizas y lavas, que se localizan en las proximidades de los aparejos volcánicos. (fig. 2)

#### 4.2. Encuadre hidrogeológico

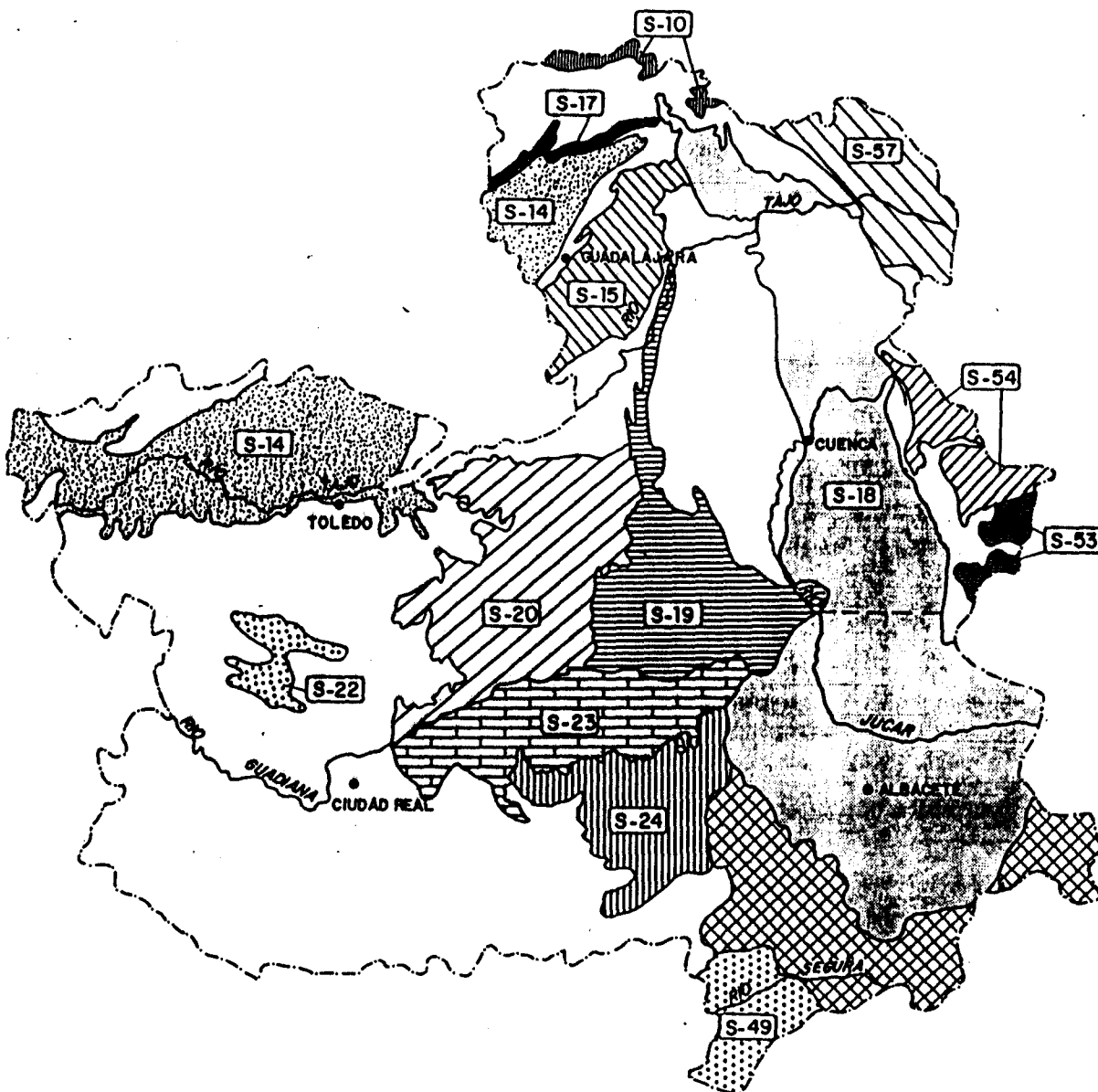
Los terrenos precámbricos y paleozoicos han sufrido importantes presiones, litostáticas y tectónicas, metamorfiizándose y - perdiendo gran parte de su porosidad.

La mayor proporción de acuíferos se presenta en terrenos Mesozoicos, las litologías de estos son fundamentalmente carbonatadas, aunque, en ocasiones, aparecen terrenos detríticos. En el Cenozoico también tenemos numerosas zonas permeables destacando - las de litologías calizas y arenosas.

En el cuaternario resaltaremos los depósitos aluviales y la pequeña presencia de niveles volcánicos permeables.

En el Plan de Investigación de Aguas Subterráneas (P.I. A.S.), del I.G.M.E., encargado para elaborar el Mapa Hidrogeológico Nacional, se describen los acuíferos de la región, enumerándolos. Así tenemos los 14 siguientes sistemas acuíferos, a los que se sumarían los acuíferos aislados de Albacete:

- 1) S - 10 Unidad Kárstica mesozoica del extremo septentrional - de la ibérica
- 2) S - 14 Terciario detrítico Madrid-Toledo-Cáceres.
- 3) S - 15 Calizas miocenas del páramo de La Alcarria.
- 4) S - 17 Reborde mesozoico del Guadarrama.
- 5) S - 18 Mesozoico del flanco occidental de la Ibérica (S-18 - Norte) y Mancha oriental (S-18 Sur).
- 6) S - 19 Unidad carbonatada mesozoica de Altomira
- 7) S - 20 Terciario detrítico-calizo del Norte de La Mancha
- 8) S - 22 Pliocuaternalio detrítico del río Bullaque
- 9) S - 23 Mancha occidental
- 10) S - 24 Carbonatos mesozoicos del Campo de Montiel
- 11) S - 49 Complejo carbonatado mesozoico prebético
- 12) S - 53 Mesozoico septentrional valenciano
- 13) S - 54 Calizas mesozoicas de Albarracín-Jaralambre
- 14) S - 57 Mesozoico de Monreal-Gallocanta
- 15) ~~XXXX~~ Acuíferos aislados de Albacete



CASTILLA-LA MANCHA. SINTESIS DE SISTEMAS ACUIFEROS



Fig - 3

#### 4.3. Unidad Kárstica mesozoica del extremo septentrional de la ibérica (S-10)

Presenta una superficie aflorante de  $3.100 \text{ Km}^2$ , se sitúa al Norte de la provincia de Guadalajara, en las Sierras de -- Atienza, Ministra y Pela, penetrando en Castilla-León.

Está constituida por terrenos carbonatados, fundamentalmente jurásicos y, a veces, cretácicos, Karstificados. El muro lo forman niveles impermeables triásicos.

Este acuífero es semiconfinado y la recarga se produce por infiltración de las precipitaciones directas sobre la afloramientos. La descarga se realiza a la cuenca hidrográfica del Due-ro.

#### 4.4. Sistema acuífero del Terciario detrítico de Madrid-Toledo-Cáceres (S-14)

Ocupa  $6.400 \text{ Km}^2$  de las provincias de Toledo y Guadalajara, extendiéndose también por Madrid y Extremadura, dentro de la cuenca hidrográfica del Tajo.

Está constituido por los terrenos detríticos terciarios y cuaternarios rellenantes de la cubeta que se extiende entre el sistema central y los Montes de Toledo, quedando limitado al Este y Sureste por las facies evaporíticas, de la zona central de la fosa del Tajo, formadas por margas, yesos y arcillas.

El acuífero está constituido por arenas que según las zonas, se muestran más o menos cementadas por arcillas. En ocasiones, también aparecen lentejones alargados de arenas y gravas, estos son más frecuentes en la zona de Toledo y menos en la de Guadalajara.

El acuífero es libre, heterogeneo y anisótropo, obteniéndose los mayores transmisividades en los lentejones. La recarga se produce por infiltración de las precipitaciones caídas sobre él. La descarga se realiza hacia el Henares, Guadarrama, Alberche, Tajo y demás valles fluviales que lo atraviesan. (fig. 4)

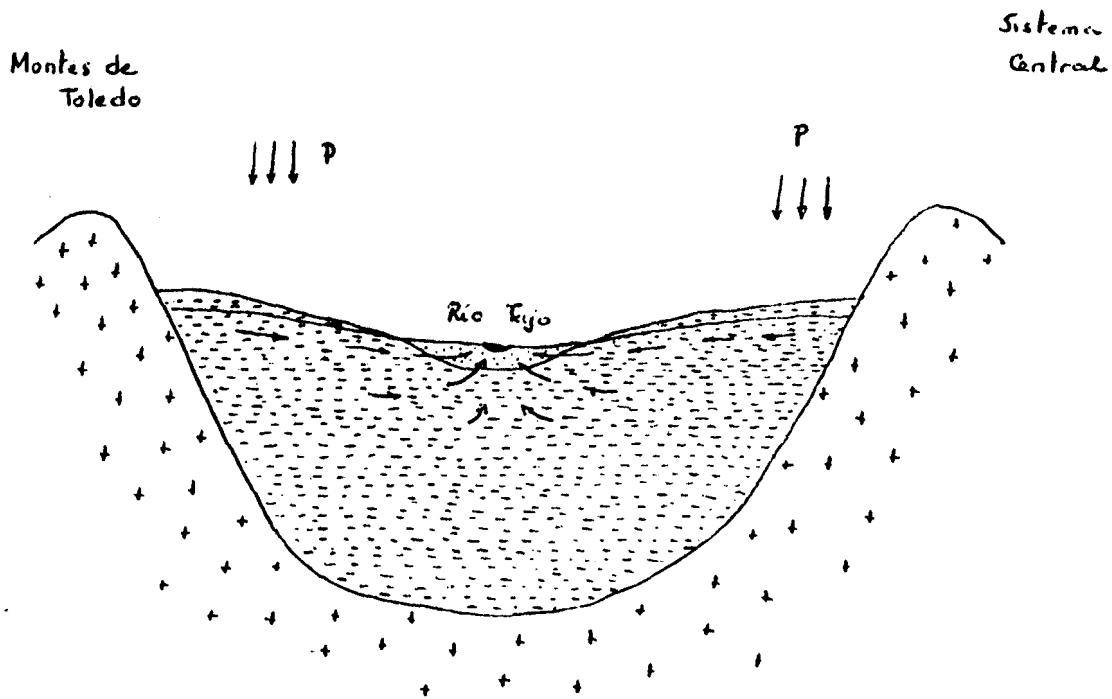


Fig. - 4 Esquema muy simplificado de la disposición del sistema acuífero 5-14 en la zona toledana



Cuaternario  
(Conglomerados, brechas, arenas, limos y arcillas)



Cenozoico  
(Arenas, calizas, arcillas, margas y yesos)



Paleozoico  
(Rocas igneas y metamórficas)

#### 4.5. Acuíferos de las Calizas Miocenas del Páramo de La Alcarria (S-15)

Estos acuíferos se localizan en la cuenca hidrográfica del Tajo. Su superficie aflorante se extiende por 2.200 Km<sup>2</sup> de los cuales 1.600 son de Guadalajara, y 600 de la provincia de Madrid.

Los acuíferos están constituidos por calizas pontienses que reposan horizontalmente sobre arcillas, margas y yesos del --miocono medio.

Los carbonatos forman mesetas denominadas páramos, ya que sobre ellos no se desarrollan casi los suelos y por tanto la vegetación. La erosión fluvial ha abierto profundos valles en los que se han generado acuíferos aluviales cuaternarios.

Tenemos una serie de acuíferos libres colgados, individualizados por los valles fluviales. La recarga se produce por infiltración directa de las precipitaciones sobre las calizas. La descarga se produce por intersección del manto de agua con la superficie topográfica, apareciendo una sucesión rectilínea de manantiales de escaso caudal. (fig. 5)

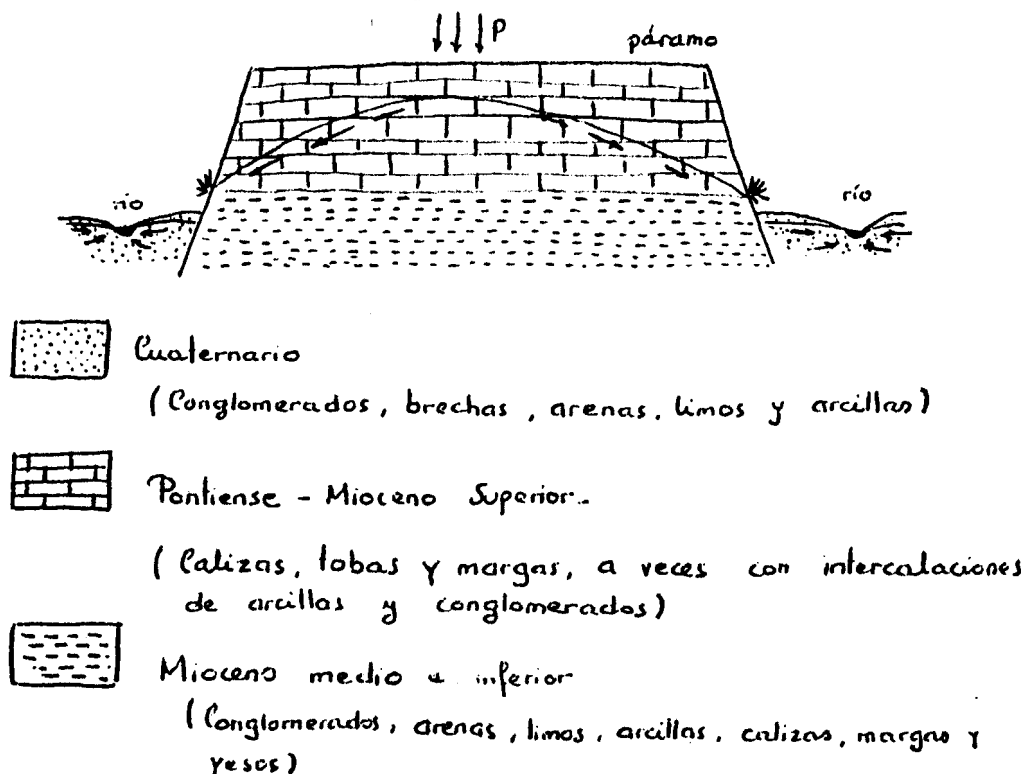


Fig.-5. Esquema simplificado de la disposición del acuífero S-15



#### 4.6. Reborde mesozoico del Guadarrama (S-17)

Este acuífero se localiza en la cuenca hidrográfica del Tajo, ocupa 100 Km<sup>2</sup> de los caudales, 60 son de la provincia de - Guadalajara y 40 de Madrid.

Está formado por calizas y dolomías del Cretácico Superior que repasan sobre el trias o sobre el paleozoico del Sistema Central y yacen bajo los terrenos terciarios de la fosa del Tajo, que están constituidos por facies evaporíticas del Paleogeno y -- por niveles detríticos miocenos.

Es un acuífero semiconfinado que se nutre de la infiltración directa de las aguas caídas sobre él, descargando sus excedentes sobre el Cañamares, Borovia, Jarama y otros ríos que lo atraviesan.

#### 4.7. El acuífero S-18

Este sistema ocupa 25.900 Km<sup>2</sup> de las provincias de Guadalajara, Cuenca y Albacete, introduciéndose en una pequeña extensión de los territorios que limitan al este con nuestra Comunidad.

La parte Norte está constituida por calizas, dolomías, -- margas, areniscas y carniolas mesozoicas que yacen sobre las facies evaporíticas triásicas y desaparecen bajo gravas, arenas, arcillas y yesos terciarios.

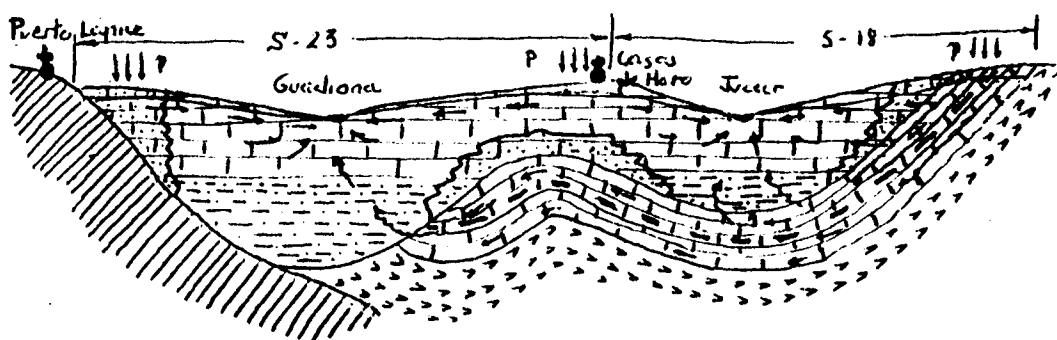
La parte Sur presenta acuíferos en terrenos miocenos -- calizas, impermeabilizadas por un substrato margoso terciario, y en terrenos calcareos jurásicos y cretácicos que reposan sobre el Trias y aparecen plegados, discordantes, bajo los anteriores.

La parte Norte constituye un acuífero semiconfinado y la parte Sur, muestra un mioceno funcionando como acuífero libre y un mesozoico funcionando como acuífero semiconfinado.

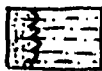
La zona Sur del acuífero S-18, denominada Mancha Occidental, está conectada geológica e hidrogeológicamente con el --- acuífero S-23, Mancha Oriental, por lo que su separación ha sido algo aleatoria, obedeciendo más a criterios hidrográficos que geológicos, el sistema S-18 corresponde a la cuenca hidrográfica del

Jucar y el S-23 a la del Guadiana.

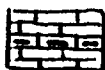
La recarga se produce en las zonas aflorantes y la descarga según la zona. En la parte Norte los caudales excedentes de los acuíferos van a nutrir los ríos Tajo, Jucar y alguno de sus afluentes, y en la parte Sur la descarga se produce hacia el Jucar, aunque en ocasiones éste actúa como río influyente.



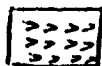
Mioceno superior y plioceno  
(Lolizos, cambio lateral a facies detriticas de grano fino).



Mioceno medio  
(Margas, cambio lateral a facies detriticas de grano fino).



Jurásico y cretácico  
(Lolizos con intercalaciones margosas)



Trias  
(arcillas, margas y yesos)



Zócalo paleozoico y precámbrico  
(rocas metamórficas)

Fig.- 6. Esquema muy simplificado de la disposición y conexión de los acuíferos S-18 y S-23

#### 4.8. Unidad carbonatada mesozoica de Altomira ( S-19 )

Esta unidad constituye la Sierra de Altomira que se extiende por 2.700 Km<sup>2</sup>, fundamentalmente por Cuenca y parte de Guadalajara, Toledo y Ciudad Real, dentro de las cuencas hidrográficas del Tajo y del Guadiana

Está formada por una serie de potentes afloramientos calizo dolomíticos, cretácicos y jurásicos de orientación Norte-Sur. Estos niveles aparecen separados por margas, margo-calizas y la facies Utrillas. Todos reposan sobre las facies arcillosas rojizas del Keuper.

El conjunto ha sido plegado por la orogenia alpina, mostrando una serie de estructuras vergentes hacia el Oeste e importantes fallas inversas que conectan entre si niveles permeables - individualizados.

Este sistema constituye un acuífero multicapa semiconfinado. (fig. 7)

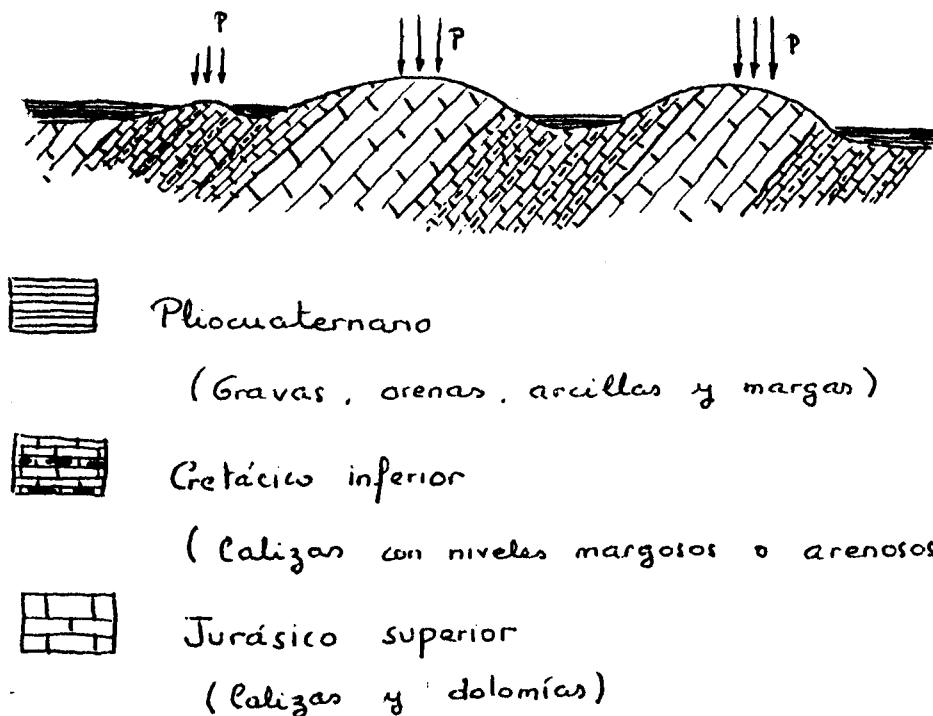


Fig.-7. Esquema muy simplificado de la disposición del sistema acuífero S-19 en su zona central

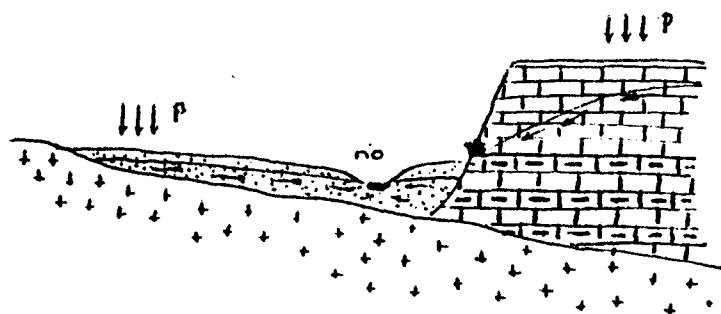


#### 4.9. Terciario calizo-detritico del Norte de La Mancha (S-20)

El acuífero aflora por 4.900 Km<sup>2</sup> de las provincias de Toledo y Cuenca.

Este acuífero está constituido por calizas, margas e intercalaciones detríticas cenozoicas que yacen sobre el zócalo paleozoico o sobre el trias, desapareciendo bajo una pequeña cobertura pliocuaternaria.

En la cuenca del Tajo aparece como un acuífero libre colgado y en la zona del Guadiana, donde tenemos varios niveles permeables, el sistema es asimilable a un acuífero multicapa de baja transmisividad. (Fig.-8)



Cuaternario

(Gravas, arenas y arcillas)



Cenozoico

(calizas y margas con intercalaciones detríticas)



Precámbrico y paleozoico

(Granito, granodioritas y neiss)

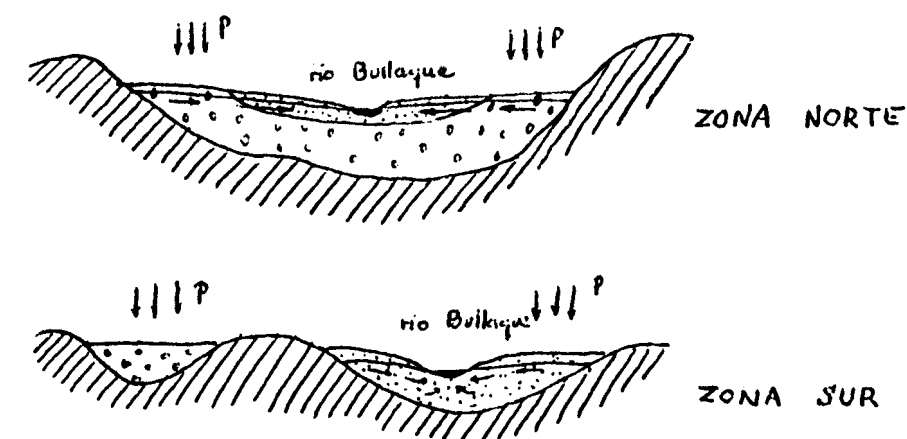
Fig.-8 Esquema simplificado de la disposición del acuífero S-20, en su zona norte.

#### 4.10. Pliocuaternalio detrítico del Río Bullaque (S-22)

Se desarrolla a lo largo de la cuenca del Río Bullaque, -  
afluente del Guadiana, ocupando 750 Km<sup>2</sup> de la provincia de Ciudad  
Real.

El sistema acuífero está constituido por gravas, arenas, -  
arcillas y limos que se intercalan, formándose una red de flujo -  
de baja transmisividad.

El acuífero es libre. La alimentación se produce por la -  
infiltración de las precipitaciones caídas sobre él y la descarga  
se realiza directamente al río. (fig. 9)



Cuaternalio

(Gravas, arenas, limos y arcillas).



Pliocuaternalio

(Riñas)



Paleozoico

(Cuarcitas y pizarras)

Fig.- 9 Esquema simplificado del funcionamiento del  
acuífero S-22.

#### 4.11. Sistema acuífero de La Mancha Occidental (S-23)

Ocupa 5.000 Km<sup>2</sup>, de los cuales 4.000 corresponden a la provincia de Ciudad Real y el resto a Cuenca y Albacete.

El acuífero se desarrolla sobre calizas del mioceno superior-plioceno que yacen horizontalmente sobre un terreno arcilloso, margoso y yesífero del mioceno medio. Bajo el cenozoico -- aparecen unos acuíferos calizos o dolomíticos, jurásicos y cretácicos, plegados, que reposan sobre un trias impermeable concordante con ellos. En las zonas más profundas tenemos el zócalo paleozoico-precámbrico muy plegado y metamorfozido.

Hacia occidente, en las zonas más superficiales también tenemos cenizas, lapillis y lavas mayoritariamente permeables.

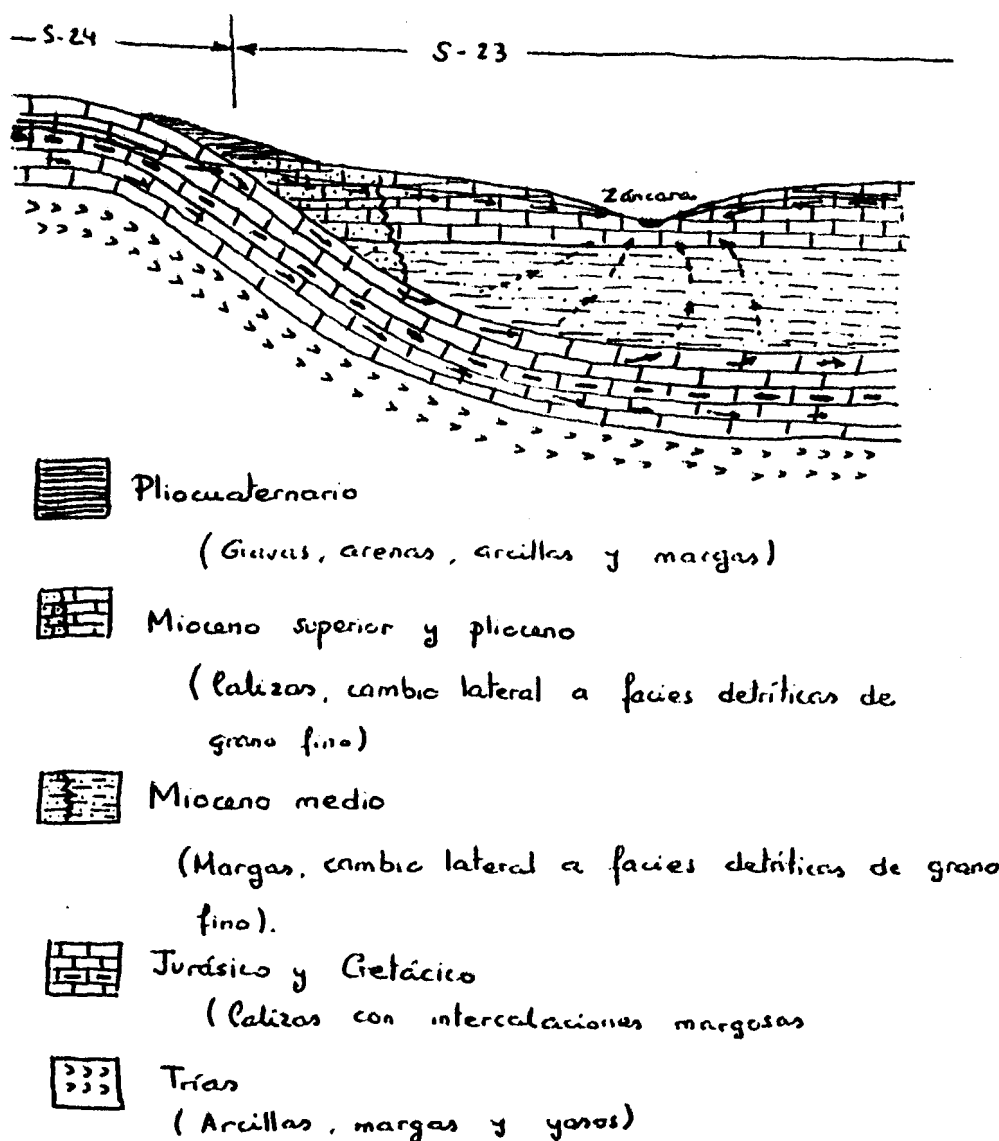


Fig.- 10 Esquema y conexión de los acuíferos S-23 y S-24

El acuífero mioceno es libre y los mesozoicos semiconfinados o confinados. La recarga es compleja, se reciben precipitaciones directas y aportes laterales de los acuíferos S-19 y S-24. También se produce una alimentación por parte de los ríos que --- atraviesan el conjunto. La descarga se produce fundamentalmente --- por drenaje al río Guadiana, o por los rebosaderos naturales, nutriendo así las Tablas de Daimiel ( Fig.- 1c)

#### 4.12. Mesozoico del Campo de Montiel (S-24)

Ocupa  $2.655 \text{ Km}^2$  de las provincias de Albacete y Ciudad Real, principalmente de la Cuenca del Guadiana y algo a la del --- Guadalquivir.

El acuífero está formado por las series carbonatadas --- del mesozoico, fundamentalmente del Jurásico inferior, el Cretácico solo aflora en la parte norte quedando recubierto, en gran medida, por una cobertura pliocuaternaria de pequeña potencia.

El muro impermeable está constituido por arcillas, yesos y margas triásicas.

El acuífero es de tipo libre, estando en conexión directa con el de la Mancha Occidental, bajo el que desaparece, integrándose en su sistema. La recarga es directa. La descarga se produce sobre las Lagunas de Ruidera, Guadiana Alto, Cañamares, ---- Azuer, etc. y también subterráneamente sobre el acuífero S-23

#### 4.13. Complejo carbonatado mesozoico prebético (S-49)

Se desarrolla a caballo entre Albacete y Andalucía, de los  $4.800 \text{ Km}^2$ , solo 1.440 corresponden a Castilla-La Mancha. Pertenece a la cuenca hidrográfica del Segura.

Constituye un acuífero multicapa semiconfinado formado por arenas, calizas, dolomías, margas, limos y arcillas cretácicas, paleógenas y miocenas. Hay un importante desarrollo de ---



procesos tectónicos alpinos con lo que tendremos niveles plegados y fallados, lo que permite la conexión hídrica entre los tramos permeables. A muro aparecen las facies arcillosas del Trias, junto con niveles cretácicos impermeables, limitando así inferiormente el sistema.

La alimentación se produce por la infiltración de las precipitaciones recibidas directamente. La descarga se realiza -- por los rios de la cuenca del Segura que lo atraviesan.

#### 4.14. Mesozoico septentrional valenciano (S-53)

Ocupa una superficie de  $470 \text{ Km}^2$  en Castilla-La Mancha, estando el resto del acuífero dentro de la Comunidad Valenciana. Se desarrolla en las cuencas del Jucar y del Turia.

El acuífero es semiconfinado y lo forman calizas y dolomías con intercalaciones margosas reposando sobre los terrenos impermeables del Trias.

#### 4.15. Calizas mesozoicas de Albarracín-Javalambre (S-54)

Se extiende por el extremo Suroriental de Cuenca, ocupando  $1.050 \text{ Km}^2$ , dentro de las cuencas del Jucar y del Turia.

Es un acuífero complejo donde se alternan niveles cretácicos y jurásicos, con predominio de estos últimos, en la base -- aparece el Trias.

#### 4.16. Mesozoico de Monreal-Gallocanta (S-57)

Ocupa  $700 \text{ Km}^2$  de la provincia de Guadalajara.

Está constituido por series carbonatadas jurásicas y -- cretácicas que descansan sobre el paleozoico del sistema ibérico o sobre el trias. El terreno trásico divide en dos partes este -- acuífero. La zona norte descarga sus aguas fundamentalmente en --

rios de la cuenca del Ebro, como el Píera y el Mesa y la parte -- Sur en las cuencas del Tago y Júcar.

#### 4.17 Acuíferos aislados de Albacete

Ocupan  $4.875 \text{ Km}^2$ , la mayor parte en Albacete, y algo en las Comunidades valenciana y murciana.

Están formados por paquetes de calizas y dolomías mesozoicas, e incluso terciarias, reposando sobre arcillas triásicas e individualizados por niveles impermeables.

### 5. APROVECHAMIENTO DE LOS RECURSOS HIDRICOS

#### 5.1. Utilización actual del agua

En Castilla-La Mancha, debido a la baja densidad poblacional y a la escasez de industrias, el agua se emplea fundamentalmente en la agricultura.

La agricultura absorbe  $1.260 \text{ hm}^3$  anuales, de los cuales el 72 % es agua subterránea. Mientras que los núcleos urbanos solo consumen  $130 \text{ hm}^3$  anuales, de los cuales el 65 % son aguas subterráneas. Aquí vemos la importancia que tienen los acuíferos, de ahí la necesidad de conocer su ubicación, características geológicas, recursos disponibles, funcionamiento y posibilidad de regulación.

#### 5.2. Abastecimiento a núcleos urbanos

En Castilla-La Mancha existen numerosas poblaciones que en las épocas de estiaje sufren problemas de abastecimiento. La mayor parte de estos pueblos se sitúan en el Macizo Hespérico, denominado, por el I.G.M.E., como dominio impermeable del paleozoico.

En estas zonas es difícil obtener caudales superiores a 6 l/s; en el sinclinal de Almadén hemos medido transmisividades -- comprendidas entre  $T = 1'43 \text{ m}^2/\text{hora}$  y  $T = 2'27 \text{ m}^2/\text{hora}$ , valores -- muy pequeños, obteniéndose en las zonas más favorables 4 l/s. Tal vez por esto, los organismos oficiales hayan dejado el estudio exhaustivo de estas comarcas para más adelante, limitándose a resolver algún problema de abastecimiento urbano concreto.

Pensamos que hay que realizar estudios locales, principalmente en acuíferos multicapas de baja transmisividad, seleccionando las zonas donde se pueden obtener los caudales más favorables, para abastecer a pequeñas explotaciones agrícolas y ganaderas, e incluso aportar algo a núcleos urbanos.

También existen pequeños, pero interesantes, acuíferos -- aluviales donde las transmisividades son mayores y los caudales -- interesantes.

En la zona de Almadén, las rocas volcánicas han sufrido importantes procesos de compactación perdiendo porosidad, sin embargo su fracturación posterior las ha convertido en acuíferos de permeabilidad secundaria, pudiendo obtenerse, en lugares donde -- concurren importantes fracturas drenantes, caudales bajos, pero -- relativamente altos dentro del contexto paleozoico y precámbrico, por ejemplo 6 l/s.

Recordemos que, con consumos de 200 litros por habitante y día, un manantial que produce 6 l/seg. puede abastecer una población de más de 100 habitantes.

Por otro lado, a lo largo de los crestones cuarcíticos, que constituyen acuíferos de fractura, existen numerosas fuentes, pero la descarga de estos niveles es rápida y en las épocas de estiajes los caudales son escasos.

Los acuíferos calizos son poco importantes, ya que por lo general en el Macizo Hespérico los bancos carbonatados son de pequeña potencia.

### 5.3 Abastecimiento industrial

Según el artículo 38 de la Ley de Aguas, de 2 de agosto - de 1.985, será objetivo de la planificación hidrológica equilibrar y armonizar el desarrollo regional y sectorial.

Dentro de la planificación, la primera prioridad es satisfacer las demandas urbanas. Respecto a la prioridad de las demandas agrícolas e industriales no hay nada escrito, salvo en lo relativo al empleo del agua para producir energía eléctrica. El artículo 58 de la ley de aguas dice que tendrán prioridad los regadíos y usos agrarios frente a la producción de energía eléctrica. Existen recursos hidroeléctricos en cabecera sin aprovechar, a su vez existen potenciales energéticos a desarrollar, mientras que - con la situación actual se pierde capacidad reguladora, no evitándose la llegada al mar de importantes caudales.

Al ubicarse la mayor parte de las industrias en núcleos - urbanos sus abastecimientos son coincidentes con los poblacionales y quedan englobados dentro de las demandas urbanas.

### 5.4. Abastecimientos agrícolas

Los principales regadíos se sitúan en Ciudad Real, nutriéndose en su mayor parte de aguas subterráneas y llevando la explotación del acuífero S-23 a límites peligrosos, ya que está disminuyendo progresivamente el drenaje natural a las Tablas de Daimiel. Los menores regadíos se presentan en Guadalajara y Cuenca. (fig.11)

Apuntaremos que, en la actualidad, aproximadamente un -- 65 % del agua subterránea empleada en los regadíos procede de -- acuíferos pequeños no encuadrados en los estudios oficiales, alcanzándose en Toledo la cifra del 35,5 %.

Las mayores explotaciones agrícolas se centran en el acuífero S-23, Mancha Occidental, ubicado mayoritariamente sobre Ciudad Real, el S-18, de Albacete, con problemas locales de sobre

explotación, y el S-14, Terciario detrítico del Madrid-Toledo-Cáceres..

	hm <sup>3</sup> /año consumo en regadíos	% del consumo en regadíos procedente de acuíferos
C. Real	460	90
Albaete	380	85
Toledo	290	40
Guadalajara	75	2
Cuenca	60	60

Los puntos claves de la problemática agrícola se centran en los siguientes aspectos:

- Existen numerosas zonas que pueden ser puestas en regadío y - hay que planificar su desarrollo.
- Hay que efectuar un importante proceso regulador para evitar - los derroches y disponer recursos en el estiaje.
- Hay que evitar la sobreexplotación, por regulación o por control, para evitar un deterioro del entorno.
- Hay que modernizar los sistemas de riego, evitando gastos superfluos.
- Hay que atacar el problema de la contaminación de los recursos hídricos, siendo necesario la determinación de perímetros de -- protección en los contornos de las tomas urbanas e industria-- les y la construcción de elementos depuradores en las salidas.

## 6. SOLUCIONES PROPUESTAS

### 6.1. En Ciudad Real

Realizar estudios sobre acuíferos locales en el Macizo Hespérico para el desarrollo integral de las zonas marginales de Sierra Morena y Montes de Toledo.

Evitar la sobreexplotación del acuífero de la Mancha Occidental para evitar la desecación de las Tablas de Daimiel, Parque Nacional, para ello se recomienda una sustitución de los sistemas tradicionales de riego por los de gota a gota y la recarga del acuífero S-23 con aguas del Záncara y del Cigüela.

También se recomienda la eliminación de las lagunas ilegales de Quero y Villafranca sobre el Cigüela y todo desvío de caudales dirigidos hacia el Parque Nacional, así como el control de los vertidos de aguas residuales de los 38 municipios que se emplazan en los márgenes de ríos alimentadores de las Tablas.

### 6.2. En Albacete

Recomendamos el empleo de recursos hídricos para los regadíos a costa de las centrales hidroeléctricas, fundamentalmente en la temporada estival, época en la que podrían entrar en juego otros recursos energéticos.

Realizar una recarga del acuífero de la Mancha Oriental, - en la zona sobreexplotada de Herrera de la Mancha, El Salobral y - Tinajeros, mediante caudales del Trasvase Tajo-Segura, ya que parece lógico satisfacer con prioridad las demandas propias.

Según el IGME, se pueden poner en regadío 25.000 Ha, mediante la explotación racional del acuífero de la Mancha Oriental.

Realizar un estudio exhaustivo de los acuíferos aislados - de la zona sur, para su racional explotación.

Y, por último, efectuar la repoblación forestal de zonas - de baja pluviometría para favorecer la infiltración del agua y evitar la erosión del terreno.

### 6.3. En Toledo

Es importante el contacto con otras regiones para la recepción de los caudales agenos en condiciones de limpieza y potabilidad.

También se recomienda aumentar los regadíos con el acuífero S-14, ya que según el I.G.M.E. podrían ponerse en regadío -- 30.000 Ha.

### 6.4. En Cuenca

Hay que iniciar la explotación controlada del acuífero S-19, evitando la desecación de las lagunas de Taray, La Nava, Navafuente, Retamar, Manjavacas y otros espacios ecológicos de La Mancha Norte.

Hay que aportar caudales del trasvase al Riansares y al Cigüela, para evitar la desecación de las Tablas de Daimiel.

También es recomendable la repoblación forestal de algunas zonas de escasa pluviometría.

### 6.5. En Guadalajara

Es importante el estudio de los acuíferos mesozoicos de los márgenes del sistema central e ibérico, ya que según el I.G.M.E., mediante una regulación apoyada en los acuíferos y en los caudales del Tajuña, Dulce, Henares, Salado, Cañamares y Borová, podrían regarse entre 3.000 y 20.000 Ha.

### 6.6. Soluciones generales

Según el I.G.M.E. la capacidad reguladora de Castilla-La Mancha es superior a 5.000 hm<sup>3</sup> anuales, que se reparten a partes iguales entre embalses y acuíferos.

La capacidad reguladora superficial viene restringida - por los mecanismos de producción hidroeléctricas y por el derroche en regadíos en la región levantina, por eso la mayor prioridad consiste en regular los recursos mediante la recarga de los embalses subterráneos, tal como se ha ensayado en las proximidades de Hellín y otros puntos. Con esto evitaríamos la desecación de algunas zonas húmedas de interés ecológico y el estancamiento agrícola en zonas de sobreexplotación.

La forestación ayudaría a este proceso.

Para mayor control del estado general de los recursos regulados propugnamos:

- a) La participación activa en las confederaciones hidrográficas, ya que la Ley de Aguas considera las cuencas como ámbito natural de gestión, manteniendo contactos activos con las regiones colindantes.
- b) Potenciar en las cuencas el desarrollo de sistemas automáticos de información hidrológica (S.A.I.H.), tal como se ha hecho en la cuenca hidrográfica del Ebro y se va a realizar en las del Júcar y Segura, entre otras.
- c) Realizar estudios de las zonas poco permeables, ya que coinciden con las de menor desarrollo socioeconómico y su despoblación es progresiva.

Como consecuencia de lo anterior:

- Se resolvería el problema de las alarmas rojas
- Se podrían poner en regadío por lo menos 75.000 Ha.
- Se dotaría a la industria de los caudales pertinentes.

Con ello habremos cimentado las bases para el desarrollo de la tierra manchega.



BIBLIOGRAFIA

- ANONIMO. Jornadas sobre la cuenca del Jucar en Castilla-La Mancha Bol. Castilla-La Mancha, nº 12, Ciudad Real. Enero 1.986
- COMA GUILLEN, J. La política hidráulica y la gestión de las aguas subterráneas de Albacete. Ciclo de conferencias divulgación de las aguas subterráneas. Colegio I. Minas de Levante. Villarrobledo. 1.975
- COMA GUILLEN, J ; PERALTA TORO, F y TRAC N.Q. Los recursos hídricos de la cuenca media y baja del río Jucar. Datos para una planificación. Simposio Nacional de Hidrogeología pp.1245-1262. Valencia. 1.976
- ELIAS CASTILLO, F y RUIZ BELTRAN, L. Estudio agroclimático de la región de Castilla-La Mancha. Dep. Agric. Junt. Com. Castilla La Mancha. 1.981
- GALVEZ-Cañero, A , PORRAS MARTIN, J. y LLORENTE HERRERO, L. Mapa de zonas áridas de España. Not. y Com. del I.G.M.E. nº 95 pp.7-10 Madrid. 1.967.
- GOMEZ ANGULO, J.A. Pasado y futuro de las aguas subterráneas de Albacete. Ciclo conferencias divulgación aguas subterráneas. Col. Ingenieros de Minas de Levante. Villarrobledo. 1.975.
- I.G.M.E. Síntesis hidrogeológica de Castilla-La Mancha. Madrid. - 1.985.
- SOLESIO LILLO, J. Estudio hidrológico del mesozoico de la Cabecera del Tajo. C.G.S. 1.981. Madrid.

PARAMETROS HIDROGEOLOGICOS

OCTAVIO PUCHE RIART

## 1. INTRODUCCION

Hidrogeología es la parte de las Ciencias Naturales que trata de las aguas, tanto superficiales como subterráneas.

La Hidrogeología es una parte de la Hidrología que estudia los factores geológicos que rigen la formación, distribución y propiedades de las aguas subterráneas, teniendo como fin su captación.

En definitiva, hay que efectuar estudios geológicos para obtener unos resultados utilitarios, esto consiste en desarrollar técnicas para aplicar saberes, azuzar el ingenio, discurrir o intuir, pero siempre con la mente dirigida hacia un fin, como toda labor ingenieril.

Hasta no hace mucho tiempo, el método de trabajo ha sido inductivo. Se realizaban múltiples observaciones del medio natural, se ordenaban y se llegaba al establecimiento de varias generalizaciones que tenían validez por su evidencia.

Modernamente, los procesos de experimentación están abriendo nuevos caminos, convirtiéndose el método deductivo en una herramienta habitual. Por eso, hoy en día, para llegar a disponer un buen conocimiento de la ciencia hidrogeológica no basta con ser un buen geólogo, hay que conocer las leyes físicas, los principios de mecánica de fluidos y disponer de una base matemática profunda.

## 2. IMPORTANCIA DE LA HIDROGEOLOGIA

El agua dulce, presente sobre la corteza, solo alcanza el 2,8 %, frente al 97,2 % de la salada. Las tres cuartas partes del agua dulce se encuentran, en estado sólido, en las regiones árticas o en glaciares, quedando el resto como nutriente de ríos y acuíferos.

Hasta el momento el agua era un recurso natural al que por lo general se accedía con facilidad, por lo que el hombre no le prestaba gran atención. Con los progresos materiales ha aumentado la demografía, y se han incrementado los consumos individuales, así co

mo los agrícolas e industriales; tal vez, los más importantes serían los consumos para regadíos, que algunos estiman superiores al 75 % - de los caudales utilizados. Esto nos ha llevado a situaciones de escasez con lo que el agua ha adquirido un valor económico importante.

Primero se han regulado, en cierta medida, los caudales -- de superficie, más accesibles pero de escasa cuantía y luego se ha -- pasado al estudio de las aguas subterráneas, menos conocidas pero -- más abundantes, pero aún queda por realizar una importante labor de detección, evaluación, captación, regulación y control de las zonas donde haga falta.

### 3. EL CICLO DEL AGUA EN LA NATURALEZA

El agua no suele mostrarse como algo estático, se puede decir que describe, tras un cierto periodo, un recorrido cerrado, parte de la atmósfera y retorna a ella por diversos itinerarios, constituyendo el denominado CICLO HIDROLOGICO (fig. 1)

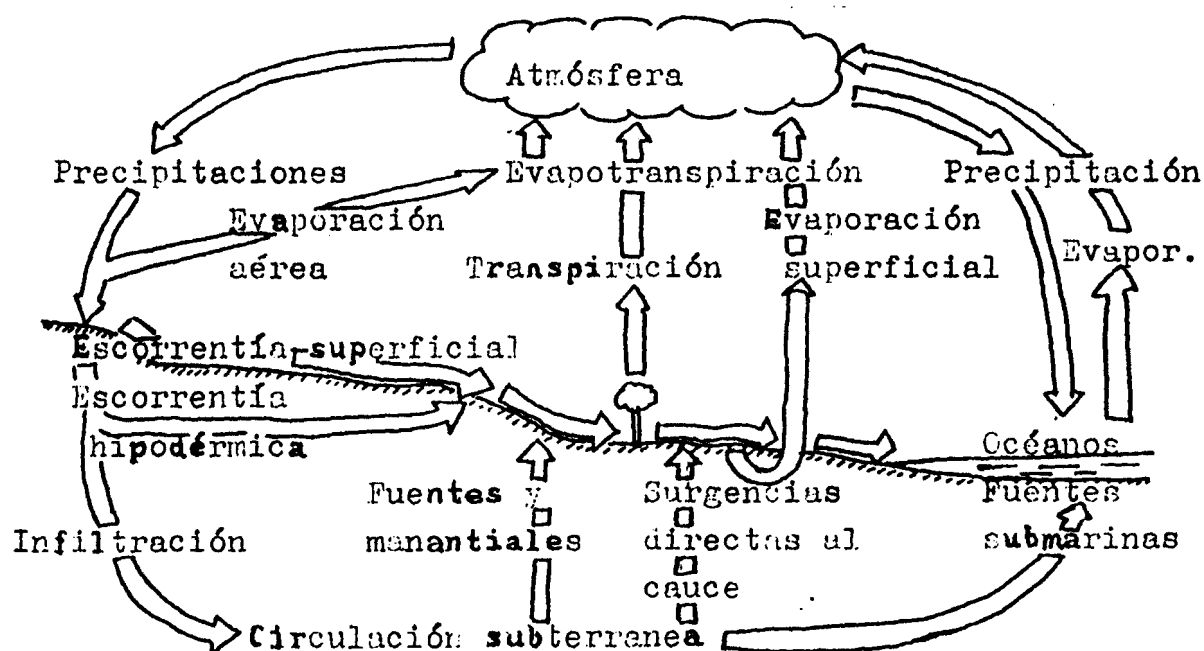


Fig.-1 Ciclo hidrológico

Las aguas de precipitación pueden llegar a la superficie terrestre, bien sobre mares u océanos o bien sobre tierra firme, -- gran parte de estos caudales retornan a la atmósfera en forma de vapor, incluso antes de alcanzar el suelo, debido a los procesos de evapotranspiración. En las zonas continentales las aguas caídas que darán almacenadas temporalmente en glaciares y lagos o pasarán a nutrir ríos, constituyendo las aguas de escorrentía, o acuíferos, --- constituyendo las aguas de infiltración.

En definitiva podríamos representar mediante un balance matemático la distribución de los caudales en un cierto intervalo elemental del ciclo:

$$P = E + I + T$$

P, E, I y T se denominan ELEMENTOS HIDROLOGICOS principales y su significado es el siguiente:

- P.- Corresponde a las aguas precipitadas, en cualquiera de sus estados físicos.
- E.- Representa las aguas de escorrentía o caudales recogidos por los ríos.
- I.- Es el agua de infiltración o agua que pasa a nutrir los acuíferos.
- T.- Son las aguas de evapotranspiración y representan cualquier tipo de retorno del agua a la atmósfera.

A nosotros nos interesan los caudales disponibles para su uso, estos son los de escorrentía e infiltración, que en numerosas ocasiones aparecen en conexión directa, siendo en casos necesario su explotación de manera correlacionada.

#### 4. ESCORRENTIA E INFILTRACION

Una parte importante del agua de lluvia es interceptada -- por la vegetación y retenida por los suelos. Cuando la capa superior de los terrenos está prácticamente impregnada, el agua empieza a -- percolar hacia el interior de la Tierra.

En general, cuando la intensidad de la precipitación sea elevada, comenzará el agua a escurrir sobre el terreno, siguiendo -- la línea de máxima pendiente, pasando a nutrir arroyos y ríos, dando lugar a la ESCORRENTIA SUPERFICIAL.

Parte del agua infiltrada, encuentra, a poca profundidad, niveles impermeables, transcurriendo sobre ellos y, tras un corto -- recorrido, surge a superficie aunándose a la escorrentía superfi--- cial. Estos caudales constituyen la ESCORRENTIA HIPODERMICA.

En cualquier cuantificación de la escorrentía también tendríamos que considerar los caudales recibidos en los cauces por las precipitaciones caídas directamente sobre ellos.

Cuando un suelo está saturado comienza la infiltración, al principio, el agua desciende por gravedad, siguiendo caminos sinuosos a través de los poros, hasta llegar a una zona saturada, donde todas las cavidades intergrano, en conexión, aparecen rellenas de este elemento, allí cambia la dirección de circulación del fluido, el cual se dirige, más o menos horizontalmente, hacia las zonas de menor presión hidrostática. Así, tras un cierto recorrido, las aguas subterráneas nutren los manantiales, fluctúan hacia un acuífero colindante o aportan caudales de base a un cauce próximo.

Si el nivel piezométrico regional es superior al nivel -- del río, el cauce puede recibir caudales del acuífero considerado, estos aportes constituyen la ESCORRENTIA SUBTERRANEA.

En otros casos el nivel piezométrico del acuífero será -- inferior al de los ríos, pasando éstos a nutrir a los acuíferos.

Por lo general, es más frecuente el primer caso, donde la escorrentía subterránea va a ser la que mantenga el caudal de los -- ríos en épocas no lluviosas, proceso en el que intervienen también el deshielo y los embalses.

## 5. COMPORTAMIENTO DEL AGUA EN EL INTERIOR DE LAS ROCAS

El agua de la zona saturada del material permeable va transitar por los poros, siguiendo itinerarios no rectilíneos, pero estos caminos pueden sustituirse, con bastante aproximación, por curvas, denominadas LINEAS DE CORRIENTE.

Si consideramos un punto cualquiera de dichas curvas y colocamos en él un tubo piezométrico, observamos cómo el agua asciende hasta una determinada cota que determina el NIVEL FREÁTICO O PIEZOMÉTRICO, coincidente con el límite superior de la zona saturada del acuífero o manto subterráneo.

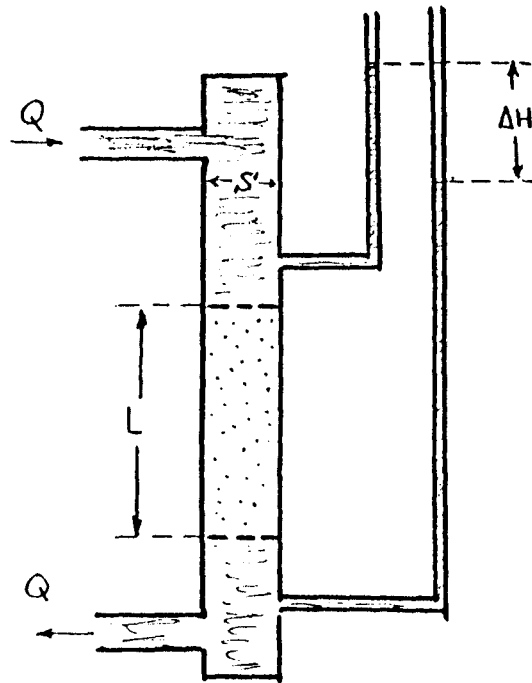
Se llama CARGA PIEZOMÉTRICA O ALTURA PIEZOMÉTRICA en un punto a la distancia vertical entre él y su nivel piezométrico correspondiente.

Si consideramos dos puntos cualesquiera del mismo manto, sus niveles piezométricos han de ser distintos, para que el agua subterránea adquiera movimiento, ya que ésta se desplaza de los niveles energéticos más altos a los más bajos, consumándose una pérdida de energía por rozamiento, de lo contrario el líquido permanecerá en reposo. A esta diferencia de nivel se le denomina PERDIDA DE CARGA.

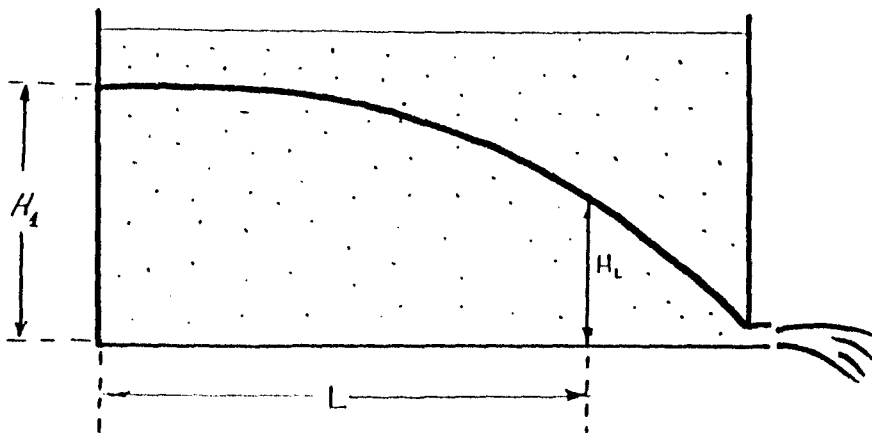
Darcy, estudiando la circulación de agua a través de un tubo vertical, lleno de arena, observó que se producía una pérdida de carga,  $\Delta H$ , deduciendo que el caudal,  $Q$ , por unidad de sección,  $S$ , es inversamente proporcional a la longitud del camino recorrido,  $L$ , y directamente proporcional a la pérdida de energía y a un coeficiente  $K$ , relativo a la naturaleza de la arena

$$\boxed{\frac{Q}{S} = k \frac{\Delta H}{L}} \quad \text{LEY DE DARCY}$$

El coeficiente  $K$  recibe el nombre de COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD o CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA, aunque en la mayor parte de las ocasiones se denomina simplemente PERMEABILIDAD.



Si consideramos un tanque relleno de arena, con un orificio en un extremo inferior, y lo llenamos de agua, se puede apreciar que entre dos puntos tenemos una pérdida de carga  $H_1 - H_2 = \Delta H$



La pérdida de carga por unidad de longitud se denomina GRADIENTE HIDRAULICO,  $i$

$$i = \frac{\Delta H}{L}$$

magnitud que, como se aprecia, es adimensional



Introduciendo este valor en la Ley de Darcy, tenemos:

$$Q/S = k \frac{\Delta H}{L} = k \cdot i$$

Y como  $Q/S$  tiene las dimensiones de una velocidad, podremos escribir la ley de Darcy de la forma siguiente:

$$V = K \cdot i \quad \text{LEY DE DARCY}$$

Tenemos que:

$$v = Q/S = K \cdot i$$

de donde despejamos K

$$K = \frac{Q}{S \cdot i} \quad \text{PERMEABILIDAD.}$$

De esta ecuación deducimos el concepto de PERMEABILIDAD como el caudal de agua que atraviesa la unidad de sección del acuífero bajo el efecto de la unidad de gradiente hidráulico. Sus dimensiones en el sistema internacional son m/s aunque lo normal es expresarle en cm/s.

Veamos a continuación los valores que presenta este parámetro:

En rocas muy permeables  $k > 10^{-2} \text{ m/s}$

En rocas permeables  $10^{-2} > k > 10^{-5} \text{ m/s}$

En rocas poco permeables  $10^{-5} > k > 10^{-9} \text{ m/s}$

En rocas impermeables  $k < 10^{-9} \text{ m/s}$

Volviendo a la Ley de Darcy, tenemos que:

$$v = \frac{Q}{S} = k \cdot i \Rightarrow Q = S \cdot k \cdot i$$

y si la sección de superficie presenta un espesor  $e$  y una anchura  $a$  podremos escribir la ecuación anterior de la forma siguiente

$$Q = e \cdot a \cdot k \cdot i$$

Definamos un nuevo parámetro, TRANSMISIVIDAD; T. como el producto del espesor por la permeabilidad, tendremos una tercera forma de escribir la Ley de Darcy:

$$Q = a \cdot T \cdot i$$

de donde  $T = \frac{Q}{a \cdot i}$ , se define transmisividad como el caudal de -

agua que circula por unidad de anchura, bajo el efecto de unidad de gradiente hidráulico. Sus dimensiones en el sistema internacional son  $m^2/s$ .

Este parámetro es el más usado en Hidrogeología, lo que se justifica al observar como un acuífero menos permeable puede transmitir mayores caudales si su espesor es mayor que la de otro más permeable y de menor potencia.

Pasemos a ver los valores de la transmisividad en función de sus cualidades transmisoras.

Transmisividad alta	$T > 10^{-1} \quad m^2/s$
Transmisividad media	$10^{-2} > T > 10^{-4} \quad m^2/s$
Transmisividad baja	$T < 10^{-4} \quad m^2/s$

En ocasiones emplearemos valores transmisivos  $m^2/hora$  para manejar así cifras positivas.

## 7. PERMEABILIDAD DE LOS TERRENOS ESTRATIFICADOS

No es raro encontrar terrenos estratificados en los que se presenta una sucesión de capas de distinta permeabilidad, tal y como ocurre en los acuíferos multicaña.

Considerando el terreno como un conjunto, se puede apreciar como varía la permeabilidad al considerar la circulación del agua paralela a los planos de estratificación o al considerarla perpendicular a ellos (fig.- 4 )

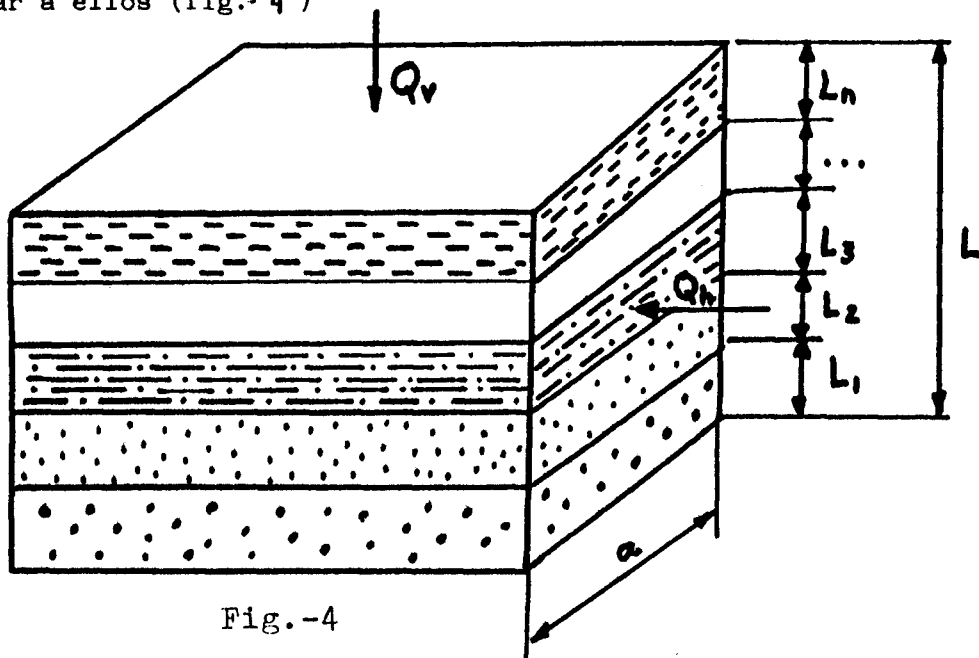


Fig.-4

Si suponemos un flujo horizontal, el caudal transmitido por el paquete es igual a la suma de los caudales individuales transmitidos por cada capa.

Tenemos que:

$$Q = v.S$$

si sustituimos S por el producto del espesor, L, por la anchura, a, la fórmula anterior se convierte en:

$$a.L.v = a.L_1.v_1 + a.L_2.v_2 + a.L_3.v_3 + \dots + a.L_n.v_n$$

Aplicando la Ley de Darcy, tenemos:

$$L.k_h.i = L_1.k_1.i + L_2.k_2.i + L_3.k_3.i + \dots + L_n.k_n.i$$

ya que, al ser la circulación paralela, podemos considerar -- que el gradiente hidráulico es el mismo para los distintos estratos.

Despejando  $k_h$  tenemos:

$$k_h = \frac{1}{L} ( L_1 k_1 + L_2 k_2 + \dots + L_n k_n )$$

COEFICIENTE DE  
PERMEABILIDAD HORIZONTAL

Si ahora consideramos que el flujo es normal a la estratificación y que los caudales circulan de forma continua, -- tenemos que la velocidad de descarga será la misma a través -- de las distintas capas.

$$v = v_1 = v_2 = v_3 = \dots = v_n$$

Y, de acuerdo con la Ley de Darcy tenemos:

$$v = k_v.i = k_1.i = k_2.i = k_3.i = \dots = k_n.i$$

Por otro lado, la pérdida de carga total es igual a la suma de las pérdidas de carga parciales en cada estrato:

$$\Delta H = \Delta H_1 + \Delta H_2 + \dots + \Delta H_n$$

Y, como:

$$i = \frac{\Delta H}{L}$$

tenemos que:

$$i_1 = \frac{\Delta H_1}{L_1} ; i_2 = \frac{\Delta H_2}{L_2} ; \dots ; i_n = \frac{\Delta H_n}{L_n}$$

luego:

$$\Delta H = i_1 L_1 + i_2 L_2 + i_3 L_3 + \dots + i_n L_n$$

En definitiva, el valor de  $k_v$  será el siguiente:

$$K_v = \frac{v}{i} = \frac{v \cdot L}{\Delta H} = \frac{v \cdot L}{i_1 \cdot L_1 + i_2 L_2 + \dots + i_n \cdot L_n}$$

pero como:

$$v = k \cdot i$$

tenemos que:

$$i_1 = \frac{v}{k_1} ; i_2 = \frac{v}{k_2} ; \dots ; i_n = \frac{v}{k_n}$$

y  $k_v$  se nos convierte en:

$$K_v = \frac{v \cdot L}{\frac{v}{k_1} L_1 + \frac{v}{k_2} L_2 + \dots + \frac{v}{k_n} L_n} = \frac{L}{\frac{L_1}{k_1} + \frac{L_2}{k_2} + \dots + \frac{L_n}{k_n}}$$

Supongamos que sólo tenemos dos capas. En dicho caso -- los coeficientes de permeabilidad considerados valdrán:

$$k_h = \frac{1}{L} (k_1 L_1 + k_2 L_2)$$

$$k_v = \frac{L}{\frac{L_1}{k_1} + \frac{L_2}{k_2}}$$

Veamos la relación que existe entre ambos:

$$\frac{k_h}{k_v} = \frac{(k_1 \cdot L_1 + k_2 \cdot L_2) \cdot \left[ \frac{\frac{L_1}{k_1} + \frac{L_2}{k_2}}{L} \right]}{L}$$

Si hacemos que  $\left(\frac{L_1}{L}\right)$  y  $\left(\frac{L_2}{L}\right)$  coincidan con  $m$  y  $n$ , tendremos:

$$m + n = \frac{L_1}{L} + \frac{L_2}{L} = \frac{L_1 + L_2}{L} = \frac{L}{L} = 1$$

E introduciendo estos valores en la ecuación que relaciona los coeficientes de permeabilidad tendremos:

$$\frac{K_h}{k_v} = (m \cdot k_1 + n \cdot k_2) \left( \frac{m}{k_1} + \frac{n}{k_2} \right) = m^2 + n^2 + m \cdot n \left[ \frac{k_1}{k_2} + \frac{k_2}{k_1} \right]$$

$$\frac{K_h}{K_v} = m^2 + n^2 + 2mn + mn \left( \frac{k_1}{k_2} + \frac{k_2}{k_1} - 2 \right) = (m + n)^2 + mn \frac{(k_1 - k_2)^2}{2k_1 k_2}$$

$$\boxed{\frac{K_h}{K_v} = 1 + mn \frac{(K_1 - K_2)^2}{2K_1 K_2} > 1}$$

De donde se deduce que la permeabilidad horizontal es mayor que la vertical, dato que podemos hacer extensivo al caso de  $n$  capas; comprobándose a menudo que el valor del primero es del orden de 10 a 20 veces el del segundo.

#### 8. CALCULO DE LA PERMEABILIDAD.

Existen diversos tipos de aparatos para medir la permeabilidad en el laboratorio, bajo la denominación de permeámetros. Tenemos dos tipos, los de carga constante y los de carga variable. El funcionamiento de ambos es similar, consiste en el establecimiento de una diferencia de carga que permita la circulación de agua a través de la muestra.

Los permeámetros de carga constante se emplean para cálculos de permeabilidad en terrenos muy permeables. Hay que determinar la velocidad de descarga  $v$ , para ello se mide el volumen de agua que pasa por la muestra en un tiempo dado:

$$Q_3 = S \cdot v \Rightarrow v = \frac{Q_3}{S}$$

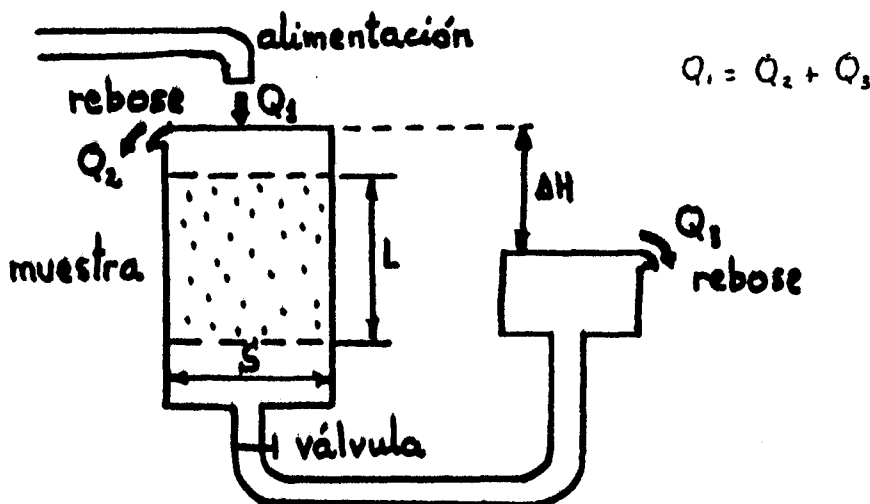


Fig.-5 Permeámetros de carga constante

Por otro lado, como el gradiente hidráulico es constante, es fácil determinar el valor de la permeabilidad,  $k$ :

$$k = v.i = v \frac{\Delta H}{L}$$

En cambio, los permeámetros de carga variable se emplean para el cálculo de permeabilidades en terrenos semipermeables. El ensayo consiste en la colocación de una muestra saturada que ha de ser atravesada por un caudal de agua, cuyo nivel no va a permanecer estático ya que no vamos a mantener la alimentación (fig.-6)

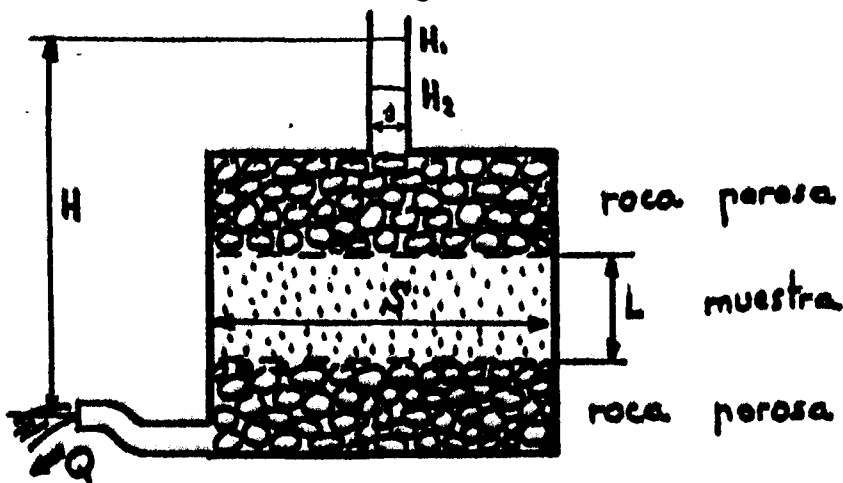


Fig.-6 Permeámetro de carga variable

Determinamos la velocidad de descenso del nivel de agua, mediante la lectura sobre una probeta graduada, calculándose el tiempo que tarda en pasar de  $H_1$  a  $H_2$ . Al igual que en el caso anterior:

$$Q = S.v = S.k.i = S.k \frac{\Delta H}{L}$$

Por otro lado, el volumen que se descarga es igual al descenso en la probeta, siempre que la muestra que hemos colocado esté saturada:

$$Q.dt = -s.dH$$

Sustituyendo  $Q$  por su valor tenemos que:

$$S.k \frac{\Delta H}{L} dt = -s.dH$$

y operando:

$$k \cdot dt = - \frac{s}{S} L \frac{dH}{H}$$

Si estudiamos la variación de altura en el piezómetro en función del tiempo transcurrido, tenemos que:

$$k \cdot t = - \frac{s}{S} L \int_{H_1}^{H_2} \frac{dH}{H} = - \frac{s}{S} L \cdot \log_e \left( \frac{H_1}{H_2} \right)$$

de donde obtenemos el valor de k

$$k = - \frac{s}{S} \cdot \frac{L}{t} \cdot \log_e \left( \frac{H_1}{H_2} \right)$$

En el campo la permeabilidad se determina mediante ensayos de bombeo. Como ejemplo veremos la base teórica del método de DUPUIT para el cálculo de la permeabilidad en un acuífero libre.

Para la realización de éste ensayo se realiza un sondeo o pozo, de diámetro  $2r$ , o se emplea alguno ya construido, introduciendo una tubería de bombeo hasta las cotas inferiores del manto, por la que extraemos agua hasta conseguir un caudal  $Q$ , en régimen permanente, o lo que es lo mismo, hasta lograr un cono de depresión estabilizado en torno al orificio perforado (fig.-7)

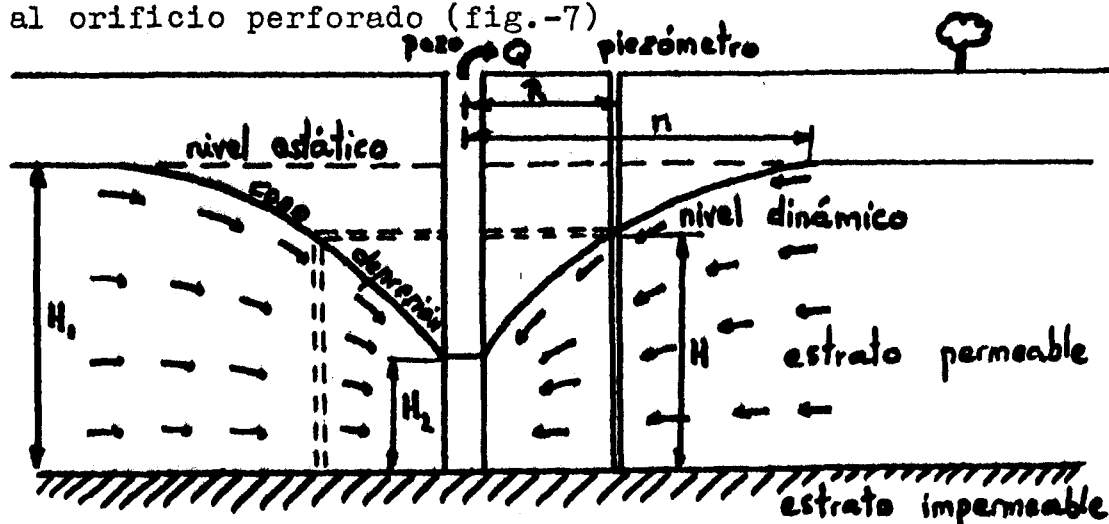


Fig.-7 Ensayo de DUPUIT

En un punto determinado del cono de depresión, podemos considerar una sección cilíndrica que es atravesada por el caudal extraído

$$Q = S.v = 2\pi RH.v$$

por otro lado:

$$i = \frac{dH}{dR}$$

luego:

$$Q = 2\pi RH.k.i = 2\pi RH.\frac{dH}{dR}.k$$

$$\int_{H_2}^{H_1} H.dH.2\frac{\pi}{k.Q} = \int_r^{r_1} \frac{dR}{R} \Rightarrow (H_1^2 - H_2^2) \frac{2\pi}{k.Q} = \log_e\left(\frac{r_1}{r}\right)$$

$$k = (H_1^2 - H_2^2) \cdot \frac{2\pi}{\log_e\left(\frac{r_1}{r}\right) \cdot Q}$$

Para el cálculo de la permeabilidad sólo nos falta conocer el valor del radio de influencia,  $r_1$ , el cual aparece tabulado para los distintos tipos de acuíferos, en función de las litologías presentes. En la teoría de ensayos de bombeo, existen diversos métodos para un cálculo mas exacto de  $r_1$ .

## 9. COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO

En un manto confinado sería posible la cesión de caudales si se producen simultaneamente dos fenómenos:

- El aplastamiento del acuífero.
- La expansión del agua confinada.

Para comprender lo expresado anteriormente, establecemos la simulación de lo ocurrido mediante el modelo siguiente: supongamos que tenemos un gas comprimido, en el interior de un recipiente, sellado por una tapadera móvil, la cual está sostenida por un resorte (fig.-8)

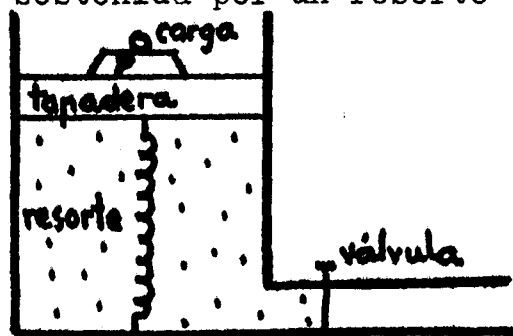


Fig.-8 Simulación de un manto confinado.



La tapa podrá moverse verticalmente, alcanzando su equilibrio cuando su peso y la carga que pongamos sobre ella sea igual al empuje ejercido por el gas mas el del resorte. Al abrir la válvula se produce la liberación y expansión del gas, descendiendo la tapadera hasta llegar a la nueva posición de equilibrio.

Se define COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO, S, a la cantidad de agua que cede un prisma de base unidad cuando se le deprime la unidad.

$$S = \frac{V_{H_2O \text{ extraída del prisma unit. al deprimirlo uni.}}}{V_{\text{prisma unitario.}}}$$

En los acuíferos libres el coeficiente de almacenamiento coincide con la porosidad eficaz.

S es un coeficiente adimensional.

**DIAGRAFIAS**

**Luis Mansilla Plaza**

**Profesor de Investigación**

**Minera de la E.U.P.A.**

## 1. Antecedentes e importancia económica.

Si tuviéramos que buscar los orígenes de la testificación geofísica, tendríamos que remontarnos al comienzo del siglo XX, a la época de los hermanos Solumberger, ya que estos fueron los primeros que utilizaron estas técnicas para la realización de un registro continuo de las formaciones con bastante precisión, que no podrían obtenerse hasta el momento nada más que analizando los testigos mecánicos.

Estas técnicas también conocidas con el nombre de diagrañas, registros o log (inglés), están basadas en el estudio de la variación de una propiedad física, química o mecánica en el interior de un sondeo con la profundidad. Con este tipo de registros se pueden resolver de forma cualitativa espesores (potencias) y litologías de los estratos llegando a una medida global que representa un volumen entre  $0,5 \text{ m}^3$  y  $1 \text{ m}^3$ .

El empleo de estas supuso una gran rapidez en la ejecución de los sondeos pasando de unos tipos de perforación tradicionales a otros -- mucho más rápidos, trayendo consigo un gran ahorro económico y de tiempo, dándole un gran impulso a todas las investigaciones del momento.

La testificación geofísica que en un principio se utilizó fue para la investigación petrolífera, hoy, aunque sigue siendo su campo más amplio dentro del mundo de los sondeos, se emplea también para localizar las capas de carbón, formaciones mineralizadas, sales potásicas, hidrogeología subterránea etc, siendo un instrumento de gran apoyo para el investigador que con estos datos puede obtener consecuencias importantes respecto a las características de los terrenos atravesados.

De todo ello se desprende que hoy en día la testificación — geofísica es un medio imprescindible, en toda campaña de investigación, — ya sea minera, hidrogeológica, de hidrocarburos, etc, no ya por su rapidez en la ejecución y resultados obtenidos sino por su gran importancia económica que supedita la realización de cualquier tipo de investigación.

## 2. Notaciones y Simbología.

Creemos interesante definir una serie de parámetros que ya son de sobra conocidos, pero que debido a su gran importancia conviene — para el estudio de la interpretación de los perfiles recordarlos para su mejor comprensión en los temas que vamos a desarrollar posteriormente.

Entre estos parámetros mencionaremos:

### a) Porosidad.

Se define como el porcentaje del volumen de huecos, en relación al volumen total de la roca. Dentro de esta distinguiremos:

-Porosidad total. Volumen total de huecos.

-Porosidad útil o efectiva. Volumen de los huecos unidos entre sí, donde puede existir la posibilidad de drenaje de — los fluidos, dependiendo su valor de muchos factores litológicos como tipo de porosidad (intergranular, de fracturas, — etc), tamaño de grano, heterogeneidad de los granos, etc.

b) Permeabilidad.

Es la capacidad de una roca de dejar circular fluidos a través de ella. La permeabilidad se mide en Darcy o milidarcy; siendo un Darcy la permeabilidad que presenta una muestra de roca de  $1 \text{ cm}^2$  de sección y 1 cm de longitud cuando  $1 \text{ cm}^3$  de fluido de viscosidad 1 centipoise pasa en 1 sg., a través de esta a la presión de 1 atmósfera.

Dentro de un medio determinado distinguimos, según el sentido del flujo del fluido dos tipos de permeabilidad:

- Permeabilidad horizontal o lateral. Flujo paralelo a la estratificación (la más importante).
- Permeabilidad vertical o transversal. Flujo perpendicular a la estratificación.

c) Saturación.

Es la relación entre el espacio poroso ocupado por el agua y el volumen total de dicho espacio poroso expresado en tanto por ciento.

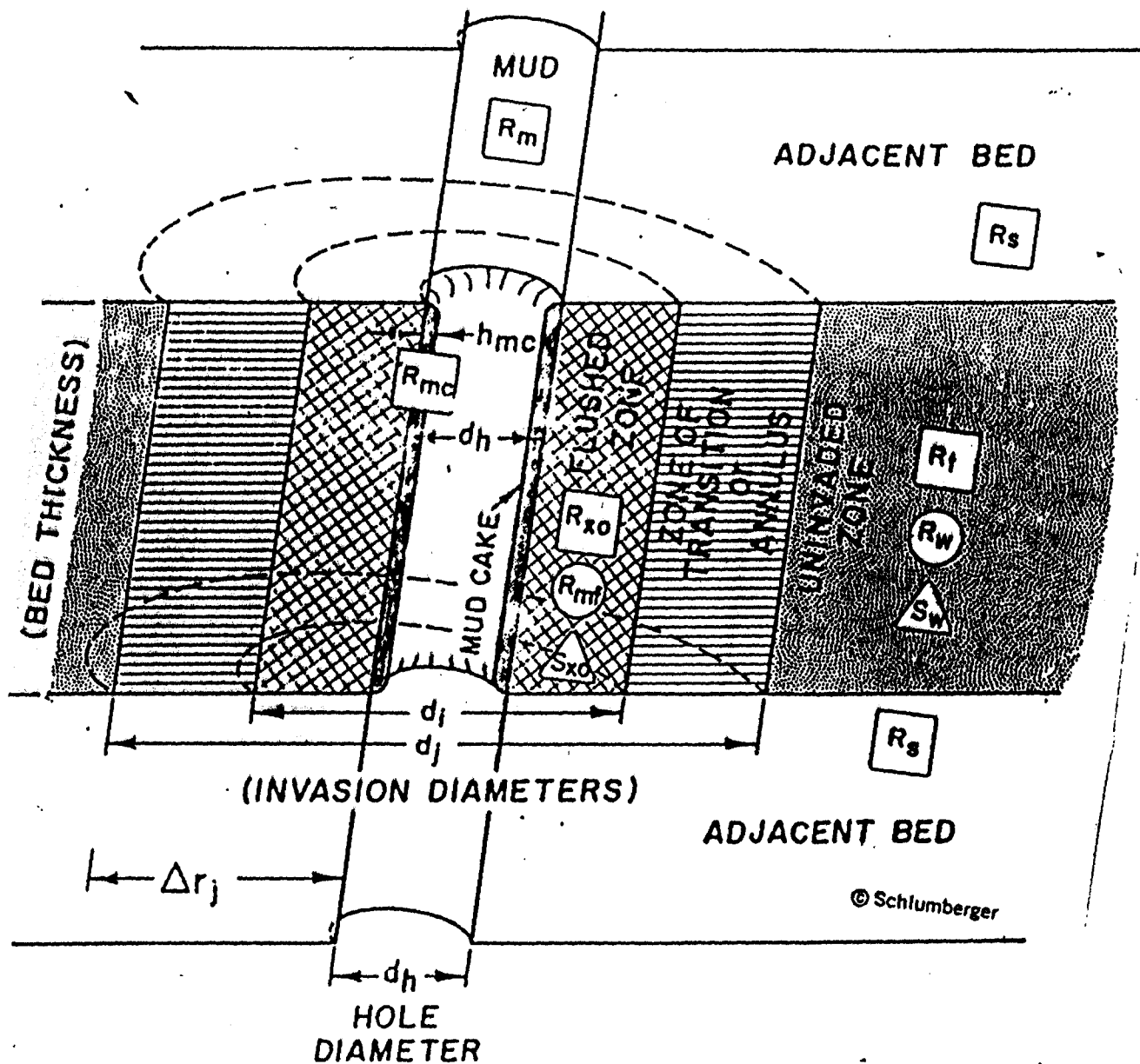
$$S_w = V_{H_2O} / V_v$$

También creemos conveniente facilitar una simbología y nomenclatura que permita acercarnos directamente al mundo de las diagráffas - utilizando su propio lenguaje.

Para ello tenemos una sección de un pozo y nos encontraremos con el siguiente esquema:

# SYMBOLS USED IN LOG INTERPRETATION - 57 - (Schematic)

- — Resistivity of the zone
- — Resistivity of the water in the zone
- △ — Water saturation in the zone



### 3. Tipos de Diagrafías.

Estableceremos una serie de diagrafías de las más usuales que hoy en día se vienen llevando acabo en la mayoría de los sondeos haciendo al final mención de otros tipos menos empleados. Así tenemos los siguientes tipos:

#### a) Diagrafías eléctricas.

- Perfil de resistividades.
- Perfil de P.S. (S.P.).
- Perfiles microresistivos.

#### b) Diagrafías radiactivas.

- Rayos gamma o radiactividad natural.
- Neutrones.
- Gamma-Gamma o densidad.

#### c) Otras diagrafías.

- Testificación acústica.
- Testificación térmica.
- Medidas de diámetros y buzamientos, etc.

#### 4. Diagramas eléctricos.

Comenzaremos la descripción de los distintos tipos de diagrama por el perfil eléctrico ya que este fué el primero que se empleo y - aunque hoy se usa menos supeditado por la gran evolución que ha sufrido la testificación en nuestros días es pilar fundamental para el entendimiento general de los demás perfiles.

##### 4.1. Perfil de resistividades.

El parámetro físico que medimos en este perfil como su propio nombre indica es la resistividad. La resistividad eléctrica de las - formaciones esta relacionada con su naturaleza geológica y distribución del agua en el seno de estas, más su salinidad. Los valores de la resistividad se expresan en Ohm.  $m^2/m$  (unidades). Para dar una idea de los valores de resistividad que vamos a encontrar damos a continuación una lista de algunas rocas.

Arenas y gravas con agua dulce . . . . .	30-200 Ohm/m.
Areniscas y calizas . . . . .	50-500 "
Arena con agua salobre . . . . .	4-30 "
Arcillas . . . . .	2-10 "
Formaciones compactas. . . . .	1000-10000 "
Agua dulce . . . . .	10-100 "
Lodos de perforación . . . . .	1-10 "
"	"
"	"
"	"
"	"



Los distintos valores de resistividad que se vayan obteniendo serán valores de resistividad aparente u observada y no verdadera ya que en los pozos al ser perforados se producen dentro de los estratos una serie de zonas provocadas por la invasión del lodo o fluido de perforación que hacen muy difícil determinar la resistividad directamente. Véase distribución de resistividades. Fig. 2.

El fundamento del perfil es similar al seguido en los métodos eléctricos que se usan en superficie, enviando corriente a las formaciones por medio de unos electrodos para crear un campo eléctrico (electrodos de corriente) y por medio de otros electrodos (potencial) se mide la diferencia de potencial que se produce entre ellos.

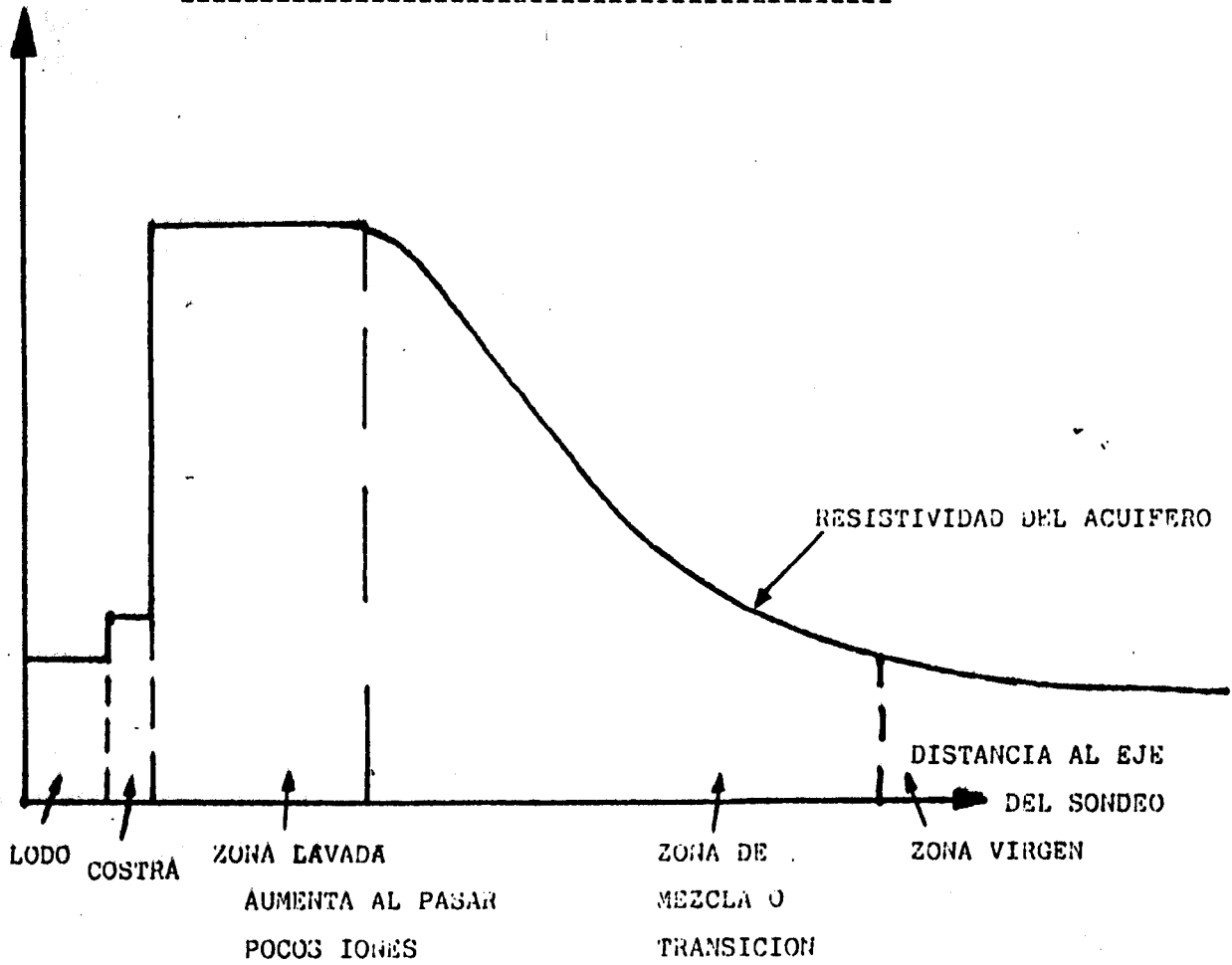
Para la determinación de la resistividad se utilizan lo que se denominan sondas de registro, obedeciendo cada una de ellas a una disposición electródica diferente. Entre ellas tenemos:

- a) Sonda normal.
- b) Sonda lateral.
- c) Laterolog.
- d) Sonda microdispositivos.

a) Sonda normal.

La disposición normal obedece a la que aparece en la Fig. 3; y a la distancia comprendida entre A y M se le denomina espaciado. Esta -

DISTRIBUCION DE RESISTIVIDADES EN UN ACUIFERO



distancia varia según la longitud que se adopte denominandose sonda normal corta cuando es aproximadamente 0,50 m. (16 pulgadas) y sonda normal larga cuando es aproximadamente 1,50 m. (64 pulgadas).

El punto de registro dentro de la sonda corresponde al punto Q y el valor de la resistividad aparente viene determinado por la ecuación

En la Fig. 4 se exponen algunos registros típicos para este tipo de sondas que se analizan a continuación:

1.) Capa más resistiva que las adyacentes.

A) Capa gruesa. Espesor  $h=10AM$ .

Se observa en la figura que la curva es simétrica y presenta un máximo en el centro de la curva donde el valor de la lectura es casi igual a  $R_t$ . El espesor de la capa en la curva es algo menor que el espesor real en un valor igual al espaciamiento.

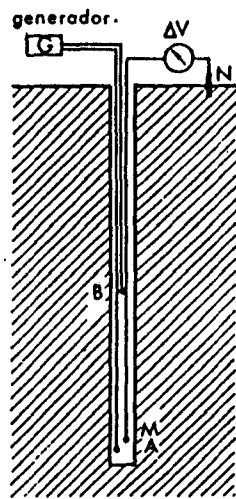
B) Capa delgada. Espesor  $h= AM/2$ .

La curva que aparece sigue siendo simétrica y se observa un mínimo de valor menor que la resistividad de la formación adyacente frente a la capa. También aparecen dos picos por encima y por debajo de la capa a una distancia entre sí igual al ancho de la capa más el espaciamiento.

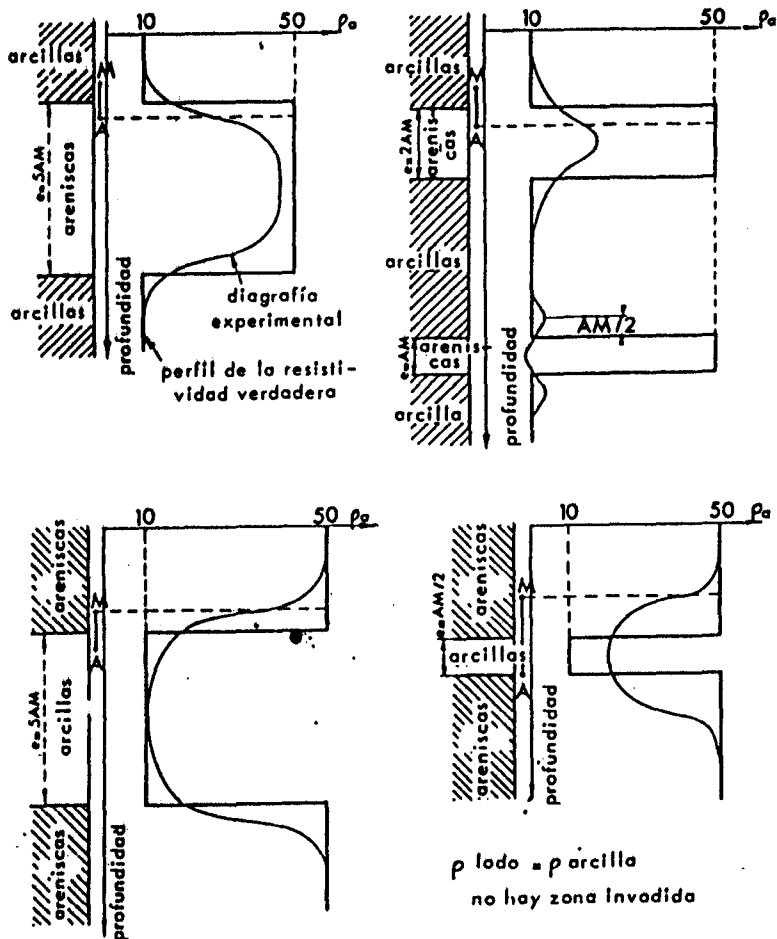
2.) Capa menos resistiva que las adyacentes.

A) Capa gruesa. Espesor  $h=10AM$ .

Esta curva también es simétrica llegando el valor de la lectura a ser casi igual a  $R_t$ . El espesor aparente de la capa es ma-



— Sonda normal.



B) Capa delgada . Espesor  $h = AM/2$ .

Observando la curva se ve que esta es simétrica presentando un valor de la resistividad mayor que el que la capa tiene en realidad. El espesor aparente de la capa es mayor que el espesor real.

La figura 5., nos muestra un registro en el que se han empleado las sondas normales larga y corta, para comprobar entre ambas y ver su aplicación.

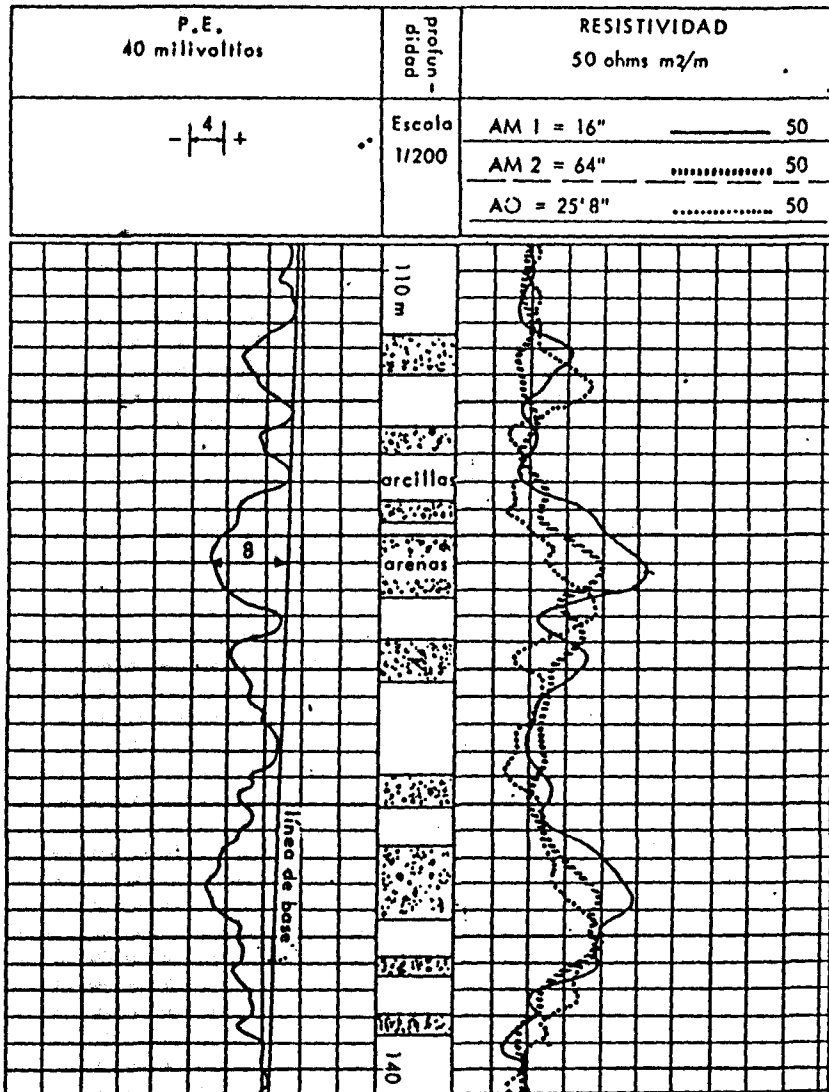
En las capas arenosas de suficiente espesor la resistividad es mayor en la sonda normal corta que con la sonda normal larga, de donde podemos deducir que las arenas son bastantes permeables y el agua conductora más que el lodo.

b) Sonda lateral.

La disposición lateral obedece a la que aparece en la Fig. 6. y a la distancia comprendida entre A y O se le denomina espaciado. Esta distancia es aproximadamente de 5,40m (18 pies).

El punto de registro dentro de la sonda al igual que en la sonda normal corresponde al punto O y el valor de la resistividad aparente viene determinado por la ecuación:

En la Fig. 6. se exponen algunos registros típicos para este tipo de sondas que se analizan a continuación:



— *Testificación eléctrica: Registros de potencial espontáneo y resistividad* (sondas normal, larga y corta, lateral). (Registro Societé de Prospection Electrique.)

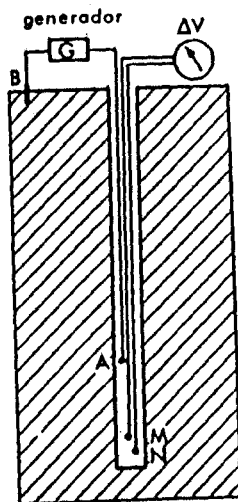
Corte geológico: Alternancia de arcillas más o menos arenosas y de arenas.

Diámetro de sondeo: 30 cm.

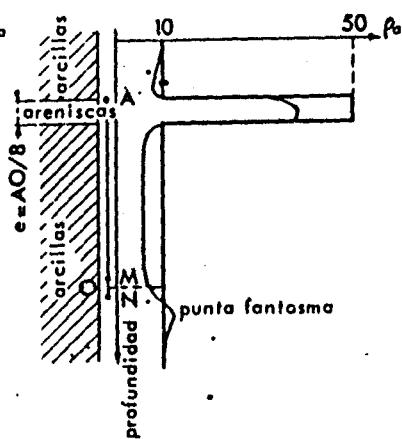
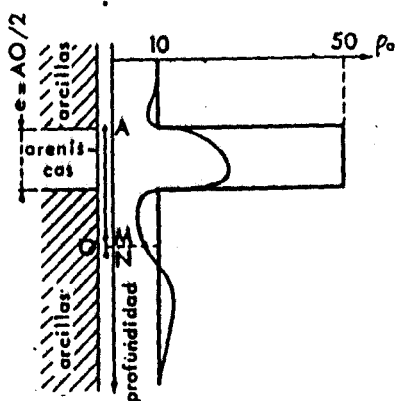
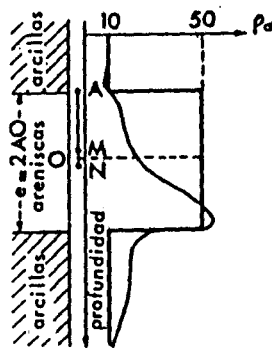
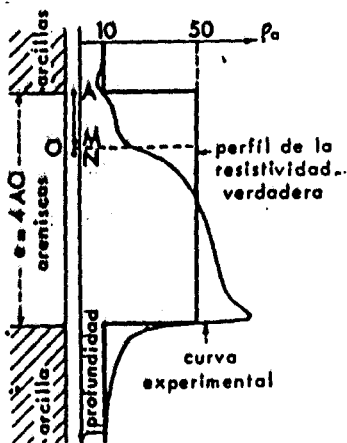
Resistividad del lodo: 7,2 ohm m a 21°C.

Resistividad calculada del agua de las arenas: 5,5 ohm m.

Porosidad calculada de las arenas: 36 %.



— Sonda lateral.



1.) Capa más resistiva que las adyacentes.

A) Capa gruesa. Espesor  $h=10AM$ .

Se observa que en el primer tramo los valores de la resistividad son menores que las lecturas cerca del borde inferior que son muy superiores y nos encontramos también con una zona central con lecturas semejantes a  $R_t$ , lecturas que para que se presenten el espesor mínimo de la capa ha de ser alrededor de 15,2 m. sin influencia de las formaciones adyacentes. El dispositivo lateral que se ha usado para obtener estas curvas es de 18 pies y 8 pulgadas y el espesor de las capas es de 58 m. para capa gruesa y 2,75 m. para capa delgada.

B) Capa delgada. Espesor  $h=AO/2$ .

La curva no es simétrica y hay un pico agudo de resistividad frente a la capa seguido de lecturas bajas en la zona ciega y luego a continuación un pequeño pico.

2.) Capa menos resistiva que las adyacentes.

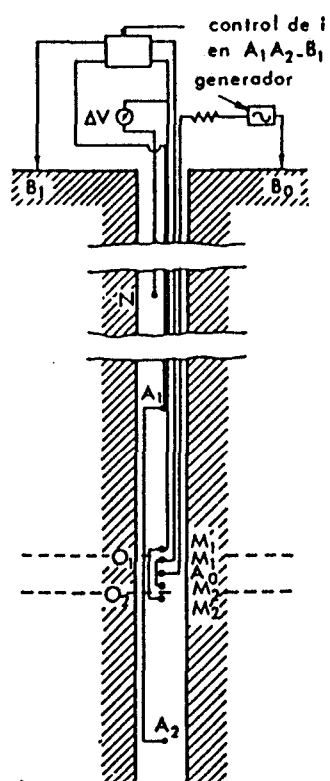
En ambos casos (capa gruesa y delgada) las curvas no son simétricas y las anomalías se extienden por debajo de la capa a una distancia mayor que  $AO$ . En la primera observamos una zona central de lectura semejante a  $R_t$ , mientras que en la segunda hay un pico de inflexión frente a la capa.

c) Laterolog.

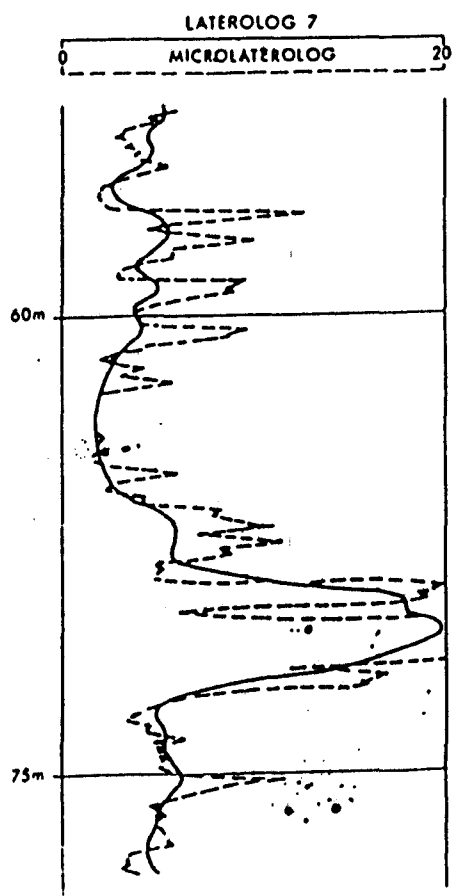
Este dispositivo se ideó con el objeto de obtener mayor precisión en el cálculo de la resistividad verdadera y en el cálculo de los espesores para el caso de capas delgadas. La disposición empleada es la de --



## LATEROLOG 7



— Esquema de funcionamiento del "laterolog".



la Fig. 7. (caso de siete electrodos) y el espaciado es la distancia — 01-02 de aproximadamente 12 pulgadas.

d) Sonda microdispositivos.

Son de pequeño espaciado y su sistema es de deslizamiento de los electrodos por la pared del pozo. Estos pueden medir directamente la resistividad verdadera si el cake es de aproximadamente 1 cm. Una gran ventaja de estos es su poder de separación de capas. Hay dos grandes grupos:

- registro micronormal.
- Microlog                      registro microlateral.

En la Fig. 8. aparecen dos registros, uno de laterolog y otro microlaterolog para su comparación.

4.2. Potencial espontáneo (S.P.).

Este perfil es un registro de la diferencia de potencial de un electrodo móvil en el pozo y un potencial fijo en un electrodo en superficie, en función de la profundidad, midiendo de esta forma el SP de las formaciones en contacto con el lodo.

Un fenómeno característico de este perfil es su comportamiento frente a las arcillas (lutitas) siendo más o menos constante la lectura observada teniendo a seguir una línea en la diagráfia conocida con el nombre de línea base de lutitas.

Otro hecho que se presenta es la desviación constante de la curva a lo largo de una capa de suficiente espesor separándose de la línea de lutitas y definiendo otra línea conocida con el nombre de línea de las arenas, obtenida uniendo los máximos de cada desviación. Fig. 9.

El Potencial espontáneo con lodos no conductores no se puede registrar, no hay conexión entre la formación y el electrodo. Su origen se debe a reacciones de tipo electroquímico y electrocinético.

#### 5. Diagrafías radiactivas.

Consisten en la medición de la radiactividad natural o inducida de las capas atravesadas en un sondeo. Hoy se emplean las siguientes:

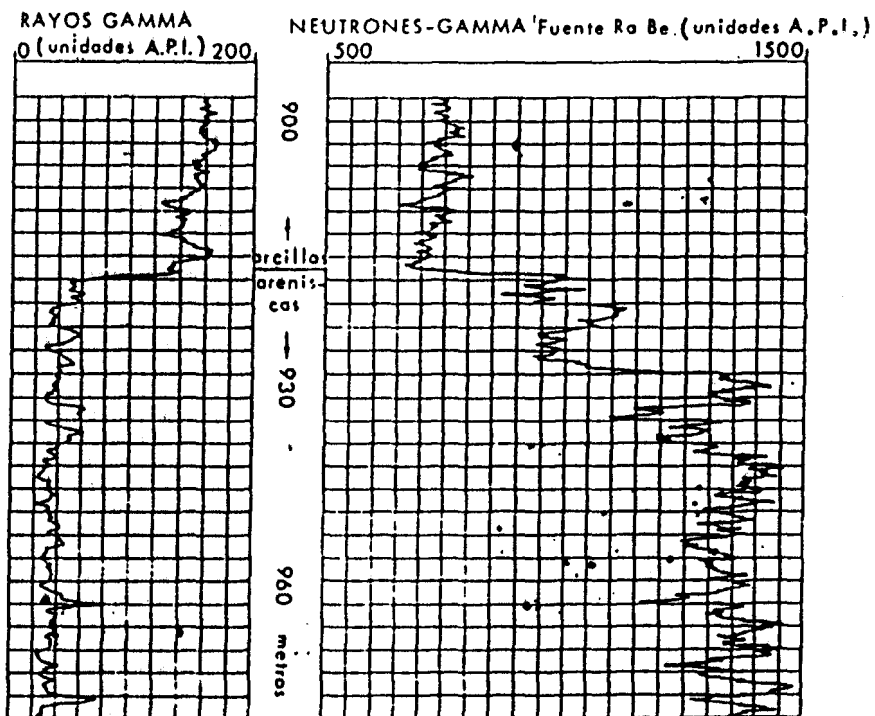
- 1) Radiactividad natural      Rayos gamma.  
   Neutrones.
- 2) Radiactividad inducida      Gamma-Gamma o densidad.

Ambos tipos se emplean en pozos entubados y pozos sin entubar.

##### 5.1. Rayos gamma.

Todas las formaciones tienen un porcentaje de radiactividad suficiente para ser característico de cada una de ellas, por ejemplo las arcillas son más radiactivas que las calizas y las dolomías, y ser diferenciado cuando se realizan mediciones dentro de un sondeo. Este tipo de registro consiste en la medición directa de los rayos gamma producidos por desintegración espontánea de las sustancias radiactivas, medidas por medio de un contador tipo Geiger-Müller o por un contador de centelleo.

En este registro el número de rayos gamma varía de unos instantes a otros y para obtener valores fiables se ha de trabajar a una velocidad determinada, para lo cual los contadores llevan una constante de tiempo que hace que éste registre al menos el 65% del cambio de radiactividad producida dentro del sondeo.



Las unidades en que se mide este tipo de radiactividad son las unidades API de radiaciones gamma. Un ejemplo de este tipo de registro es el de la Fig. 10.

### 5.2. Perfil de Neutrones.

Este tipo de registro consiste en:

- a) Emisión de neutrones (fuente de emisión de la sonda).
- b) Choques de los neutrones con los átomos de las formaciones y pérdida de velocidad hasta que se estabilizan, apareciendo los llamados neutrones térmicos.
- c) Absorción de los neutrones térmicos por ciertos átomos como  $H_2$  y Cl, etc, y emisión de rayos gamma.
- d) Recepción de rayos gamma por medio de un contador situado en la sonda de registro.

Es de destacar en el perfil de neutrones su sensibilidad al número de átomos de hidrógeno presentes en la formación así como la gran influencia que presenta en la calidad del registro la presencia de lodo y de tubería de revestimiento. Un ejemplo de este registro es el de la figura 10.

### 5.3. Gamma-Gamma o perfil de densidad.

Consiste en el bombardeo de las formaciones por medio de rayos gamma emitidos por una fuente de cobalto ( $Co\ 60$ ) por ejemplo. Estos rayos chocan con los electrones de las rocas cediendo energía hasta desaparecer. Posteriormente se mide a poca distancia del pozo la intensidad gamma que vendrá influida por el número de electrones de la roca; número que es directamente proporcional a la densidad de la roca.

El dispositivo empleado se desplaza a lo largo de las paredes por medio de un patín deslizante, con el objetivo de evitar la influencia del lodo, cke, etc. La profundidad de penetración es pequeña del orden de los 15 cm. y la sonda más usual en el mercado dentro de las que se usan — para este tipo de registros es la sonda con sistema sónico compensado que permite un registro directo de la densidad. Otra utilidad de este perfil — es la identificación de capas y la determinación de la porosidad.

#### 6. Otras diagrfias.

A modo de resumen se exponen los siguientes tipos:

- Acústica. Mide la velocidad del sonido en las formaciones atravesadas. Sirven para el cálculo de fracturas, porosidad, etc.
- Térmica. Detecta límites arcillosos.
- Caliper. Para medias de diámetros y grietas.

#### 7. Programa típico para hidrogeología (sondeo sin tubería).

A continuación se presenta un programa de diagrfias posibles a realizar en un sondeo hidrogeológico. Vease pag.

Registros		Principales informaciones que proporcionan
Potencial espontáneo		- Resistividad $P_e$ y calidad del agua de las capas.
Resistividad	Normal corta	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Límite de las capas.</li> <li>- Resistividad <math>P_i</math> de la zona invadida por el lodo.</li> <li>- Factor de formación (<math>P_i/P_o</math>) y porosidad.</li> </ul>
	Normal larga y/o lateral	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Resistividad <math>P</math> de las capas.</li> <li>- Factor de formación (<math>P/P_o</math>) y porosidad.</li> </ul>
	Normales corta y larga	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Resistividad <math>P_e</math> del agua de las capas.</li> <li>- Localización de zonas permeables (detección de zonas invadidas por el lodo por comparación de los registros normales corto y largo).</li> </ul>
Rayos gamma		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Contenido en arcilla de las formaciones.</li> <li>- Distinción entre arcillas y acuíferos de agua salada ambos conductores.</li> </ul>
Calibre		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Util para la interpretación de registro eléctrico y de rayos gamma.</li> <li>- Localización de zonas arenosas o fracturadas en areniscas, calizas o lavas.</li> </ul>
Velocidad del agua		- Estimación del caudal relativo de los diferentes -- acuíferos.

SISTEMAS DE INFORMACION EN HIDROGEOLOGIA

Autor: Antonio Garzón López  
Maestro de Laboratorio del  
Departamento de Cálculo Nu  
mérico e Informática de 1ª  
E.T.S.I. de Minas de Madrid.



## I N T R O D U C C I O N

El objetivo de esta conferencia es describir un sistema de información y cómo aplicarlo al ciclo hidrológico.

Para ello describiremos en primer lugar la noción de Sistema de información , su relación con los procesos tanto automático como manual y a los distintos tipos de sistemas (Centralizados, distribuidos, en red) con sus ventajas e inconvenientes.

Posteriormente analizaremos su aplicación al ciclo hidrológico planteándolo como flujo de información y la forma de canalizar ese flujo como sistema distribuido, bien entendido que este planteamiento es una posibilidad de un sistema distribuido y éste a su vez es una forma posible de constituir un sistema.

## SISTEMAS DE INFORMACION

Un sistema de información es el conjunto de todos los datos, procesos, resultados, canales, etc que forman parte de un flujo de información determinado.

Un sistema de información genérico contendrá:

- Entradas (datos)
- Proceso o procesos
- Salidas (Nuevos datos, mas elaborados que pueden servir de entradas a otros procesos)
- Realimentación de ese proceso
- Conexiones con otros sistemas.

Los procesos que componen un sistema de información, como cualquier proceso general, pueden ser automáticos o manuales.

Un proceso general contiene los pasos siguientes (vease la figura de la página siguiente):

- Información base del proceso
- Análisis de los datos
- Decisión de la operación a efectuar
- Comando u orden de ejecución
- Operación propiamente dicha
- Evaluación de los resultados obtenidos

En un proceso automático, existe un paso previo a la decisión que consiste en que del análisis efectuado resulte que la información es insuficiente y, portanto, recicle al paso de obtención de más información.

En un proceso con intervención humana, todos los pasos pueden tener esa intervención, y ese paso previo es innecesario pues todos los pasos tienen reciclado manual en caso necesario.

### Tipos de sistemas

Un sistema de información se puede formalizar de muchas maneras pero, en general, responden a tres esquemas básicos que vamos a ver a continuación.

Sistemas centralizados: un sistema centralizado es aquel en el cual todas las fases del proceso, y todos los procesos que pueden integrar el sistema, se llevan a cabo en un solo lugar. Esto se puede asimilar a un ordenador con múltiples terminales no autónomos.

Sistemas distribuidos: un sistema distribuido es aquel en el cual cada fase del proceso, o cada proceso, se

## I N T R O D U C C I O N

El objetivo de esta conferencia es describir un sistema de información y cómo aplicarlo al ciclo hidrológico.

Para ello describiremos en primer lugar la noción de Sistema de información, su relación con los procesos tanto automático como manual y a los distintos tipos de sistemas (Centralizados, distribuidos, en red) con sus ventajas e inconvenientes.

Posteriormente analizaremos su aplicación al ciclo hidrológico planteándolo como flujo de información y la forma de canalizar ese flujo como sistema distribuido, bien entendido que este planteamiento es una posibilidad de un sistema distribuido y éste a su vez es una forma posible de constituir un sistema.

## SISTEMAS DE INFORMACION

Un sistema de información es el conjunto de todos los datos, procesos, resultados, canales, etc que forman parte de un flujo de información determinado.

Un sistema de información genérico contendrá:

- Entradas (datos)
- Proceso o procesos
- Salidas (Nuevos datos, mas elaborados que pueden servir de entradas a otros procesos)
- Realimentación de ese proceso
- Conexiones con otros sistemas.

lleva a cabo en un lugar distinto pero dejando los procesos, o fases, mas complejos para un lugar común.

Esto se puede asimilar a un ordenador central con terminales autónomos capaces de realizar determinadas funciones que descargan al primero del trabajo fácil.

Sistemas en red: un sistema en red es aquel en el que cada fase del proceso o cada proceso, se lleva a cabo en el lugar más apropiado en cada momento.

Este concepto se puede asimilar a una red local de pequeños ordenadores que comparten periféricos y, en cada momento, uno de ellos, que controle la red, decide por qué impresora va a salir determinado listado o en qué CPU debe ejecutarse determinado programa.

Ventajas e inconvenientes: el orden en el que se han descrito los sistemas es de complejidad creciente y este hecho puede tener el inconveniente de que cuanto más complejo es un sistema mayor cantidad de personal cualificado es necesario (incrementándose el coste de la instalación).

La ventaja principal es que se aprovechan mejor los recursos en el mismo sentido de complejidad creciente.

Es necesario, por tanto, a la hora de crearlo, encontrar un equilibrio entre el sistema de información que tenemos (sus flujos de información) y el sistema posible con los medios de que se dispone.

Hay que reseñar asimismo que estos tipos de sistemas son básicos y que el que se formaliza en el momento oportuno tendrá, normalmente, parte de las tres clases de sistemas y no tiene por qué pertenecer a un solo tipo de sistema.

El bit es la unidad mínima de información para el ordenador. Esta unidad de información puede tomar dos valores 0 o 1. Utiliza, por tanto, una lógica binaria.

Agrupando 8 bits, de forma que se traten conjuntamente podremos tener una información más completa (por ejemplo: 0-255 como número.  $2^8$  posibilidades).

Agrupando 16 bits tendremos aún mayor cantidad de información posible ( $2^{16}$ ). Agrupando 32 bits ( $2^{32}$ ) etc.

Esto quiere decir que cuantos más bits de información base utilice el ordenador más rápido y preciso será y además podrá controlar mayor cantidad de memoria central. (Con 8 bits se pueden utilizar 64K (1K = 1024), con 16 bits ~ 1000K).

El tiempo de operación básica se sitúa actualmente en un orden de 10 ns 1-  $\mu$ s.

Memoria central: Es la zona donde se almacenan temporalmente los programas y datos del proceso que se esté ejecutando en un momento determinado.

Es importante que sea lo suficientemente grande como para contener todos los datos ya que si no es así el ordenador debe trabajar con la memoria masiva la cual es de mucho más lento acceso y el proceso más complicado.

El tiempo de acceso en memoria central es del mismo orden que el de la unidad central de proceso (10 ns-1 $\mu$ s).

Memoria masa: Son dispositivos de almacenamiento semi permanente. En ellos se guardan todos los programas y datos de todos los procesos que se desee.

Pueden ser de varios tipos: discos flexibles, discos rígidos, cintas magnéticas, etc. Todos ellos constan de una superficie magnética que se magnetiza y según el sentido de esta magnetización conserva un 0 o un 1 binario.

El tiempo de acceso en estos dispositivos depende de cada uno de ellos. En discos magnéticos es del orden de lms, en cinta magnética del orden de 10-100ms.

Unidades de Entrada/Salida: Las unidades de E/S son los aparatos que nos permiten la comunicación con el ordenador. Son impresoras, teletipos, terminales, dispositivos gráficos, etc.

Su forma y manejo no son determinantes del tipo de ordenador ni de sus características fundamentales.

### Software

El software del ordenador está constituido por todos los programas que utiliza el ordenador para permitirnos su manejo. Los más importantes son: Sistema operativo, compiladores y programas de utilidad.

## MEDIOS INFORMATICOS

Los medios que brinda la informática se pueden dividir en medios físicos y medios lógicos.

Los medios físicos, "hardware", son los circuitos, - placas, conexiones eléctricas, etc. que conforman el ordenador.

Los medios lógicos, "software", son los programas, - lenguajes, sistemas operativos, etc. con los que podemos comunicarnos, en un lenguaje inteligible, con el ordenador.

### Hardware

El hardware del ordenador consta, simplificando al máximo de:

- Unidad central de proceso
- Memoria central
- Memoria masa
- Unidades de entrada/salida (periféricos)

Unidad Central de Proceso: Es el verdadero "cerebro" del ordenador. Controla todos los pasos del proceso tanto de -- cálculo como de E/S.

Su característica definitoria más importante es el tamaño de información-base con la que trabaja. Un procesador de 8 bits es peor que uno de 16 bits y este, a su vez, peor que -- uno de 32 bits.

El sistema operativo es un conjunto de programas que pone al ordenador en servicio y, con un lenguaje propio, nos permite controlar todos sus recursos.

Los compiladores son programas que traducen programas hechos por el usuario en un lenguaje de alto nivel (FORTRAN, -- COBOL, PASCAL, etc.) al lenguaje máquina que utiliza el ordenador.

Los programas de utilidad son un conjunto de programas que realizan funciones especiales que no están previstas por el sistema operativo.

### CLASIFICACION

Los ordenadores se pueden clasificar por sus características en:

- Microordenador:
  - UCP: 8 bits.
  - Memoria central: ~ 64K
  - Memoria masa: Cassette o disco flexible.
  - Son válidos en el proceso técnico a reducida escala.
- Ordenador Personal:
  - UCP: 16 bits.
  - Memoria central: 64K - 1000K
  - Memoria masa: Disco flexible (~ 380K) y disco a disco (10-20 M).
  - Son válidos en gran parte de los procesos técnicos.



- Mini ordenador: - UCP: 16-32 bits
  - Memoria central: 512K - 8M
  - Memoria masa: disco flexible (1-10M)
    - disco duro (10-400M)
    - cinta magnética: (10-50 M)
  - Son utilizables en, prácticamente, todas las escalas del proceso.
  
- Ordenador medio: - UCP: 16-32-64 bits
  - Memoria central: 5-30M
  - Memoria masa: disco duro: 30-400 M
    - cinta magnética: 10-50M
  - Son el tipo de ordenador usado normalmente en gestión de grandes procesos.
  
- Ordenador grande: - UCP: 32-64-(128) bits.
  - Memoria central: 10-30M.
  - Memoria central: disco duro: 30-400M.
  - Este tipo de ordenador se utiliza en grandes procesos de cálculo. Normalmente estos ordenadores tienen a otros ordenadores más pequeños como terminales, de manera que el central sólo realiza los procesos más duros.

## SISTEMAS DE INFORMACION EN EL CICLO HIDROLOGICO

### Nivel primario

En este nivel primario, los procesos son estudiados en forma puntual.

La recogida de datos y los tratamientos posteriores se efectúan con vistas a trabajos determinados aunque parte de los datos pueden provenir de otros procesos u obras.

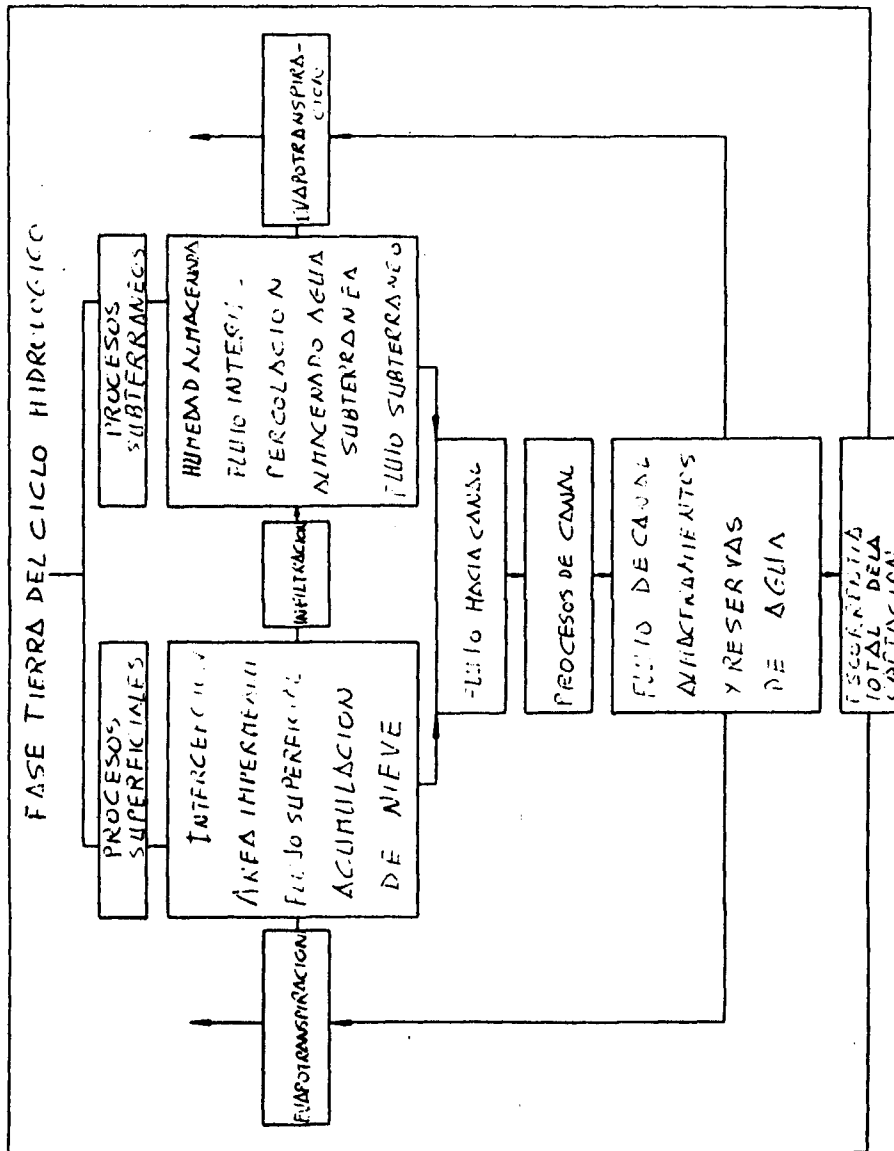
Los tratamientos pueden ser efectuados por ordenadores pequeños (del tipo Ordenador Personal) con un rendimiento adecuado. También pueden ser efectuados en ordenadores mas potentes ( del tipo miniordenador) con la ventaja de que posteriormente los datos pueden servir para estudios más profundos.

El esquema de los problemas a estudiar es el de la figura de la página siguiente.

### Procesos en la superficie del suelo:

- Intercepción: la intercepción se define como aquel proceso por el cual la precipitación es retenida en hojas, ramas y tallos de la vegetación y en los restos que cubren la superficie del suelo. De aquí es evaporada sin añadirse a la humedad del suelo. El toldo de vegetación es la superficie vegetal que puede interceptar precipitación. La densidad del toldo puede definirse como la proyección horizontal de las superficies vegetales por unidad de área terrestre que interceptarán vegetación.

La densidad del toldo varía de una vegetación tipo a otra. También varía de un área a otra dependiendo de la distribución de vegetación. Con vegetación de hoja caduca, la estación del año afectará la magnitud de la densidad toldo y de una región a otra esta variación estacional será diferente.



La lluvia que pasa es la porción de precipitación que alcanza la superficie del suelo pasando a través de los espacios del toldo de vegetación. Esto puede pasar tanto directamente como por exceso de la capacidad de almacenamiento del toldo.

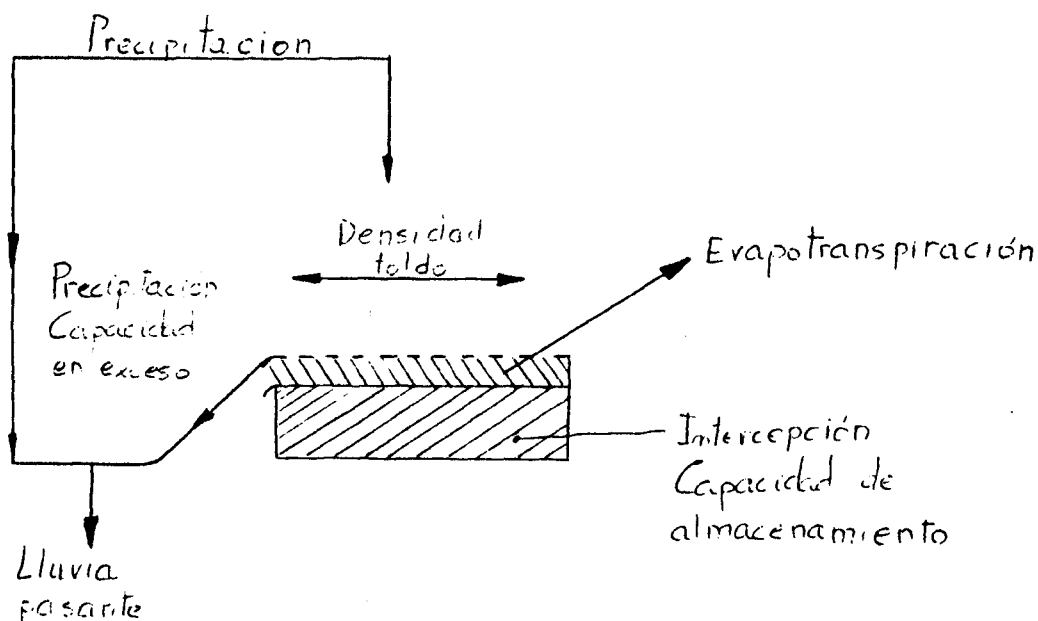
Tradicionalmente los datos son analizados para obtener una correlación simple del tipo:

$$\text{Lluvia pasante} = A * \text{Precipitación} - B$$

donde A y B son coeficientes a determinar

Esta relación será diferente para cada época del año.

El proceso de intercepción puede ser representado como un almacenamiento de capacidad finita. La capacidad es función de la densidad del toldo de vegetación que a su vez es función del tipo y distribución de la vegetación y de la estación del año.



La entrada al almacenamiento de intercepción será la precipitación continua y la salida será una combinación continua de evapotranspiración y humedad en exceso de la capacidad de intercepción

- Area impermeable: Se define como área impermeable la superficie terrestre con una capacidad de infiltración igual a cero. En un análisis hidrológico se deben reconocer dos clases de área impermeable: las áreas directa e indirectamente conectadas; donde el término "conectadas" se refiere a la unión entre la superficie terrestre y el sistema de canales.

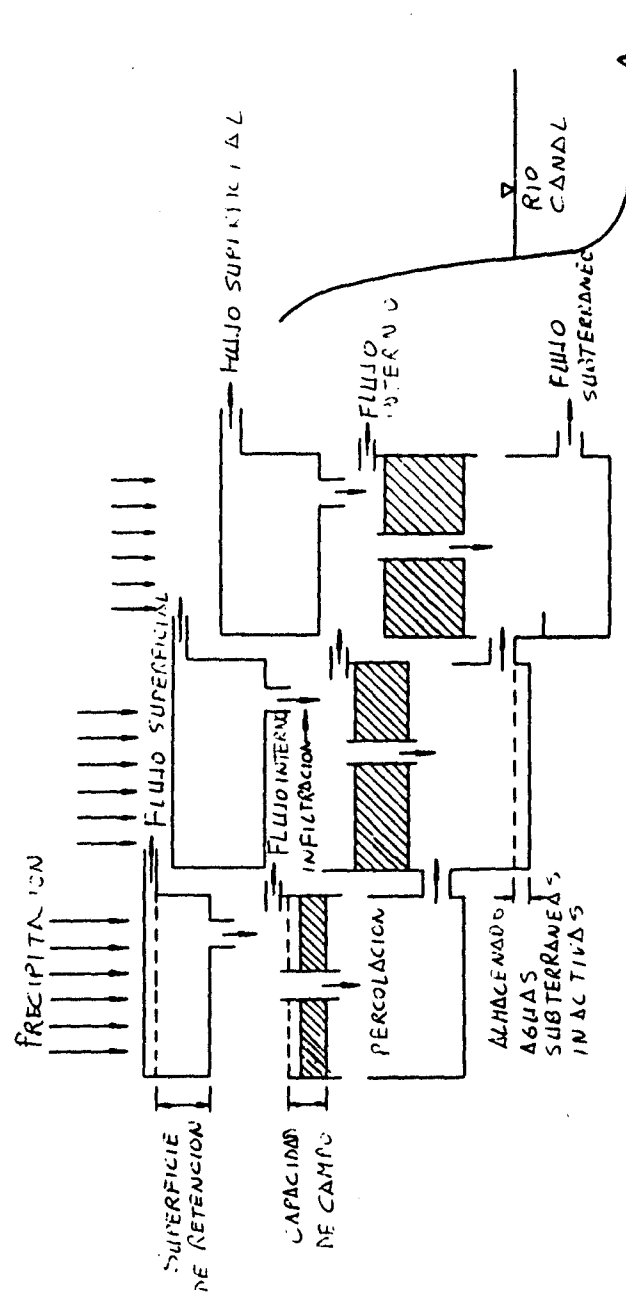
Area impermeable directamente conectada significa áreas de la superficie terrestre desde las cuales el agua fluye directamente hacia sistemas de canales.

Area impermeable indirectamente conectada incluye áreas impermeables que drenan hacia áreas permeables en las que la capacidad de infiltración es mayor que cero.

El tiempo y movimiento del agua sobre áreas impermeables, puede ser calculado como flujo superficial u obtenido dividiendo el área en elementos contribuyentes y construyendo un diagrama Tiempo-Area.

- Infiltración: La infiltración se define como el movimiento del agua a través de la superficie del suelo hacia el interior bajo la influencia de la gravedad y la capilaridad. El ratio de infiltración es la cantidad relativa de agua que se introduce en el interior del suelo por unidad de tiempo resultado de una combinación de condiciones durante ese tiempo. Estas condiciones incluyen la cantidad y distribución de la humedad del suelo, alimentación de agua y permeabilidad. Cuando la alimentación excede el ratio de infiltración, entonces esta infiltración es el máximo para las condiciones previstas y es llamada capacidad de infiltración. La capacidad de infiltración variará con el tiempo debida a los cambios de almacenamiento y humedad del suelo y las

características del suelo.



La infiltración ha sido estudiada de dos formas:

1.- Investigación pura que aspira a encontrar una solución analítica completa de las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales que gobiernan el movimiento del agua en medios porosos no saturados.

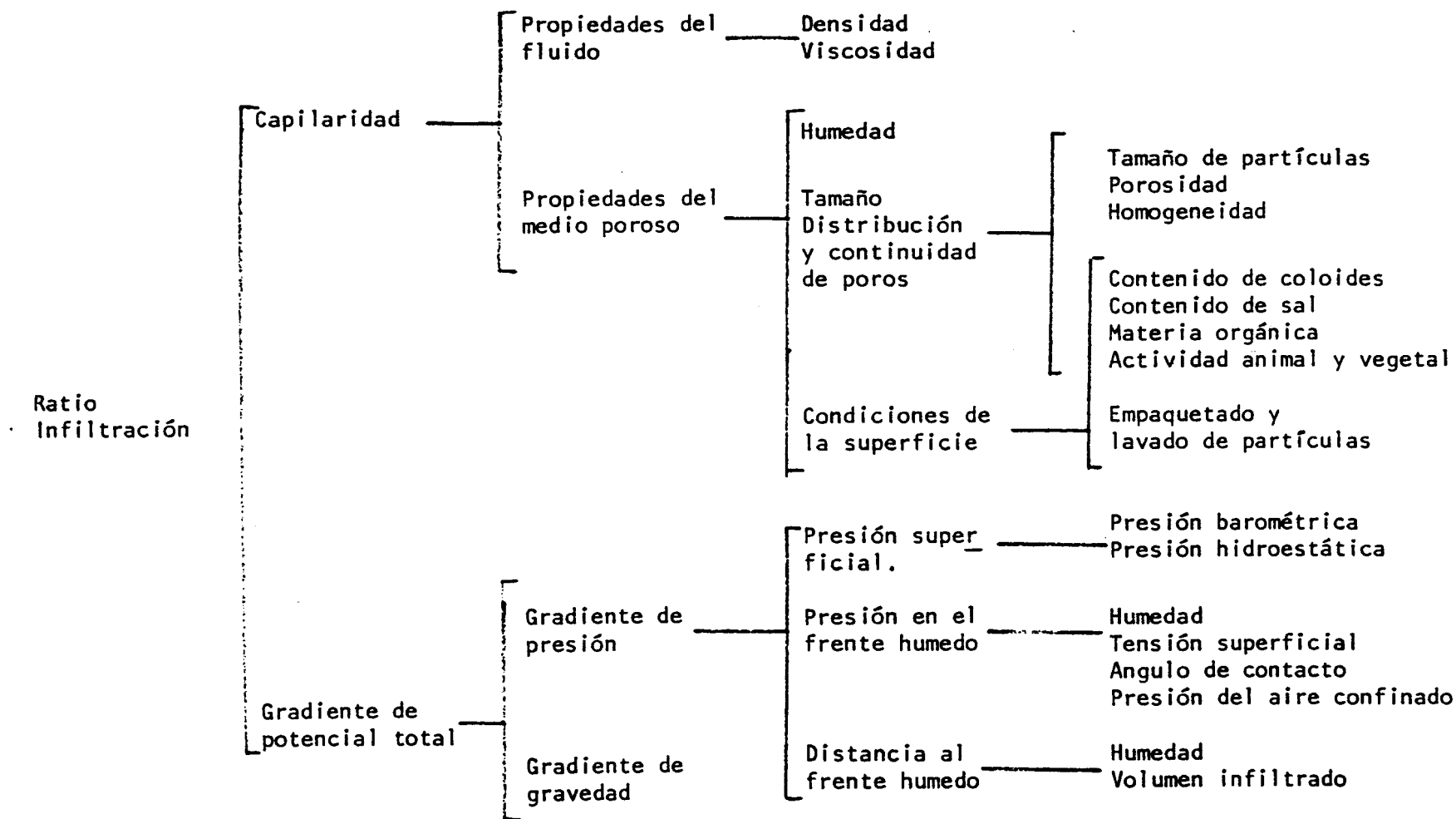
2.- Investigación aplicada que aspira al desarrollo de relaciones empíricas basadas en datos fácilmente obtenibles en condiciones de campo.

Los más importantes factores que afectan a la infiltración se expresan en el esquema de la página siguiente.

La utilización preferente de unos factores sobre otros dependerá del tipo de problema planteado y del tipo de ecuación buscada ya que la utilización de todos los factores daría lugar a graves problemas de complejidad.

- Flujo Superficial: El flujo superficial se define como el movimiento del agua sobre la superficie del terreno hacia el sistema de arroyos de éste. El flujo superficial es caracterizado a menudo como una delgada lámina de agua fluyendo sobre la superficie terrestre. Se le considera como un flujo laminar bidimensional, en las condiciones iniciales, que llega a turbulento cuando la profundidad y velocidad del flujo aumentan hasta condiciones límite a partir de las cuales la turbulencia no disminuye.

La profundidad del flujo superficial es generalmente pequeña y el volumen de agua que cubre la superficie del terreno como una hoja es relativamente grande. Este volumen se denomina retención superficial. Los ratios de flujo superficial varían a lo largo de una captación debido tanto a variaciones de la topografía del terreno como a variaciones de la

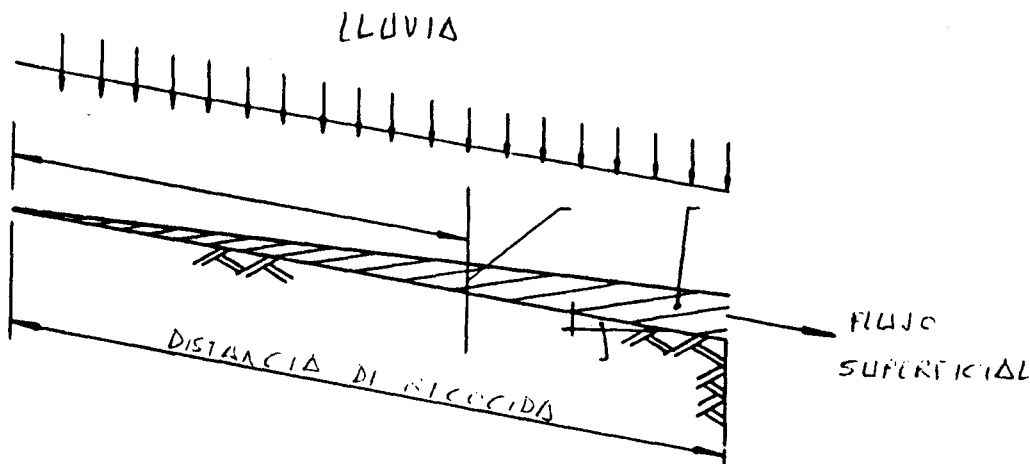




capacidad de infiltración.

El proceso de flujo superficial puede afectar la forma de hidrograma debido a su interacción con el proceso de infiltración y a las propiedades de atenuación del almacenamiento de retención superficial.

Un esquema del proceso es el de la figura siguiente:



Al igual que el proceso de infiltración, el flujo superficial ha sido estudiado de dos formas:

- Por métodos estadísticos (Relación entre los datos)
- Por métodos matemáticos (Estudios por diferencias finitas).

Los factores que intervienen son los mismos que en el proceso de infiltración.

- Evapotranspiración: La evapotranspiración es la -- pérdida de agua de las superficies del terreno y del agua de -- una captación debido a los procesos combinados de evaporación y transpiración. Evaporación es la transferencia del agua desde el estado líquido al estado vapor. Transpiración es el proceso por el que las plantas absorben humedad del suelo y la liberan en el aire como vapor a través de su metabolismo.

Se hace necesario distinguir los términos de evapo-- transpiración potencial y real. La primera es el ratio máximo al que el agua abandona la superficie del terreno en un tiempo dado asumiendo una cantidad ilimitada de humedad del suelo. La evapotranspiración real será menor o igual que el vapor potencial debido a que la humedad asumida no es la real.

El objetivo general del proceso será calcular continuamente la evapotranspiración real. Este cálculo, debido a su complejidad teórica, se efectúa normalmente por métodos estadísticos ya sea por medidas de evapotranspiración en lagos, o bien por medidas meteorológicas.

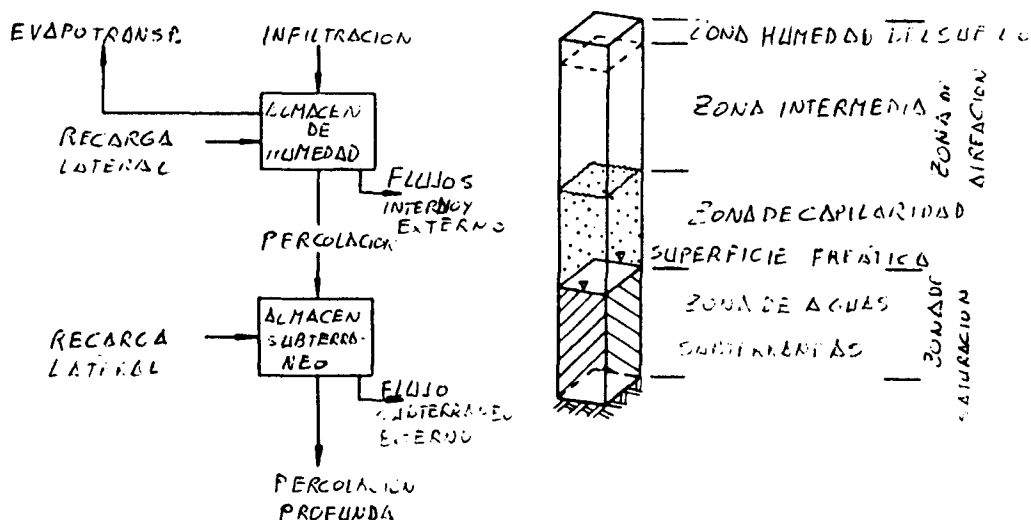
#### Procesos subterráneos:

- Flujo interno: Flujo interno es el agua que se mueve lateralmente a través de las capas superficiales del terreno hacia los arroyos. Es muy dependiente de la geología de la captación y puede, dependiendo de las formaciones interiores, reaparecer en la superficie junto al flujo superficial.

En general, ya sea en modelos matemáticos o estadísticos, se hace depender el flujo interno de la humedad del suelo de la infiltración.

- Movimiento y almacenado de la humedad del suelo: El movimiento y almacenado de la humedad del suelo afecta a los procesos de acumulación de agua en el suelo y su movimiento tridimensional desde este almacenamiento. El almacenado de humedad es un proceso clave en el ciclo hidrológico (es necesario hacer la salvedad de que la humedad concernida en este apartado es la que está en la zona de aireación del terreno y superiores, las inferiores son tratadas como aguas subterráneas).

Un esquema de los procesos subterráneos es el de la figura:



Para este proceso se pueden aplicar tanto modelos matemáticos como estadísticos.

- Flujo y almacenamiento de aguas subterráneas: El flujo y almacenamiento de agua subterránea afecta a la acumulación de agua y su zona de almacenamiento y su descarga en ella. Percolación profunda es el proceso por el que el agua alcanza un almacenamiento profundo inactivo que no descarga en la captación.

La teoría del flujo y almacenado de aguas subterráneas puede ser estudiado desde muchos puntos de vista. Tres de estos son: el ingeniero hidrológico, el especialista en física del suelo y el hidrogeológico. Desde cada uno de estos puntos de vista se han efectuado trabajos con el fin de determinar los dos términos en cuestión.

### Nivel Secundario

Los problemas estudiados en este nivel se refieren, en general, al tema de gestión de aguas a nivel de cuenca hidrográfica, basándose en modelos de simulación que permiten prever, en base a unos datos supuestos aunque coherentes con la realidad, la respuesta de la cuenca ante una serie de acontecimientos (lluvias, sequías, consumos, etc.).

En cuencas donde el ciclo hidrológico se da en todas sus etapas, el máximo beneficio podría obtenerse gestionando de forma conjunta las aguas superficiales y las subterráneas.

A la vista del ciclo hidrológico, cuyo diagrama aparece en la figura, se observa que, normalmente, sólo se gestiona el agua superficial, pero teniendo en cuenta el hecho de que el agua de una cuenca es prácticamente constante, podemos plantear una gestión conjunta que puede proporcionarnos unas reservas constantes.

Tras el análisis de cada uno de los factores que intervienen en una cuenca, se comprueba que existen en una cuenca -- distintos puntos según su función en ella:

- . Aportadores superficiales-Afluentes, arroyos, etc.
- . Aportadores subterráneos-Corrientes subterráneas (bombeos).
- . Precipitaciones (lluvia, nieve, etc).
- . Agua importada (de otras cuencas)
- . Reservas superficiales (lagos, embalses)
- . Reservas subterráneas (niveles piezométricos)
- . Descarga superficial (salida de la cuenca por desembocadura).
- . Descarga subterránea (percolación, a otras corrientes subterráneas).
- . Consumo (ciudades, industria....)
- . Agua exportada (a otras cuencas).

El planteamiento de la cuenca como colección de puntos de funciones precisas con conexiones entre ellos posibilita la - utilización de grafos, y de la teoría que los soporta, en la simulación.

En el departamento de Cálculo Numérico e Informática de la E.T.S.I. de Minas de Madrid, en colaboración con el Departamento de Aguas del I.G.M.E., se ha llevado a cabo un programa, por D. Rafael Medina Ferro, que permite la simulación asignando prioridades de suministros, pesos dentro de estas prioridades y distinguiendo entre consumo indispensable y no indispensable en los nudos de consumo y asignando disponibilidades de los embalses, permitiendo o no trabajar bajo mínimos, importando agua y bombeado de acuíferos, todo ello en función de los datos de entrada de la simulación.

La unidad de tiempo de la simulación es el mes y los resultados de ésta son gráficas y listados donde se indican el nivel de satisfacción de demandas, los niveles finales de los puntos de aportación y el proceso seguido.

Otros programas de simulación han sido puestos a punto en la División de Aguas del I.G.M.E.

Las necesidades informáticas de procesos de este tipo, se sitúan en los ordenadores tipo miniordenadores y superior. Esto se debe a que las necesidades de memoria son grandes y además el tiempo necesario para la simulación empieza a ser asequible en este nivel de ordenadores.

La forma lógica de trabajar con este tipo de ordenadores y procesos es crear una base de datos de la cuenca con todos los datos pluviométricos, topográficos, hidráulicos, de evaporación, consumo, etc de la cuenca en cuestión de que se disponga. Es interesante, de esta manera, centralizar todos los datos procedentes de los estudio de nivel primario en algún lugar de forma que sea directamente utilizable en este nivel. Además se puede utilizar conexiones telefónicas para transmitir los datos desde el punto de toma hasta el ordenador central y/o crear una red local con los ordenadores que formen parte permanentemente de la red de toma de datos y análisis primarios.

#### Nivel regional

En el nivel regional el problema fundamental a plantear, y prácticamente único, es el de gestión de aguas.

Nuevamente se tratará de ir a una gestión conjunta de aguas superficiales y subterráneas pero ahora la particularidad añadida señala la utilización en la gestión de varias cuencas conectadas artificialmente.

La simulación o estudio de los efectos de trasvase no es un grave problema al nivel de gestión de aguas en una cuenca. El mismo programa utilizado en el caso anterior (nivel de cuenca) puede volver a serlo ahora teniendo simplemente en cuenta las importaciones y exportaciones de agua en los puntos que se produzca, pero el estudio conjunto de la gestión de varias cuencas es un problema poco estudiado y resuelto, cuando se ha presentado, en forma política.

Para el estudio de este problema son necesarios ordenadores potentes, en cuanto a su capacidad de cálculo, y con una buena posibilidad de acceso a los datos de las cuencas que intervienen en el proceso así como los datos de forma y de capacidad del propio trasvase. El equipo necesario se sitúa desde la gama más alta de los miniordenadores hasta los ordenadores medios.

Para que el estudio de este tipo de problemas sea más fácilmente realizable es conveniente, casi imprescindible, disponer una base de datos centralizada o, siguiendo el esquema -- distribuido, acceso cómodo a las bases de datos propios de cada cuenca. Es conveniente que la organización de las bases de datos de las cuencas sea similar ya que con ello se reduce de forma - amplia el trabajo de programación del problema.

### CONCLUSION

Con todas las ideas expresadas aquí, la forma final - resultante del sistema de información propuesta sería:

- Nivel puntual: ordenador de tipo personal o miniordenadores cada uno trabajando en forma autónoma.
- Nivel de cuenca: ordenadores de tipo miniordenador. Cada uno conectado a los de nivel puntual que le competen (en su propia zona) de forma que puedan recibir información - de éstos, estructurarla y utilizarla para los problemas específicos de la gestión de la cuenca.



La estructuración de la información debe ser formalizada mediante una base de datos pues de esta forma el acceso a la información es más rápido y el manejo de ésta más claro.

- Nivel regional: Ordenadores de tipo mini (gama alta) o medio. Deben estar conectados a todos los de nivel de cuenca de la región (a estos efectos España es una región aunque cada Comunidad Autónoma podría funcionar como tal para las cuencas que no salen de su territorio). Deben tener una base de datos general y acceso a las bases de datos del nivel de cuenca o formalizar entre todas las de nivel de cuenca una base de datos distribuida.

MODELOS DIGITALES EN HIDROGEOLOGIA

Francisco Javier Elorza Tenreiro  
Departamento de Cálculo Numérico e  
Informática.  
E.T.S. Ingenieros de Minas (Madrid)

## 1. INTRODUCCION

Una valoración de la reserva de agua de la tierra revela que el agua - salada de los océanos supone el 97,2% y que el agua en los continentes - asciende sólo al 2,8% del total. De estas reservas de agua, sólo una pequeña parte es adecuada para el consumo humano, el agua potable, y de ella el 98% se encuentra como agua subterránea.

El balance hidrológico global anual de nuestro planeta se estima en -- las siguientes cifras:

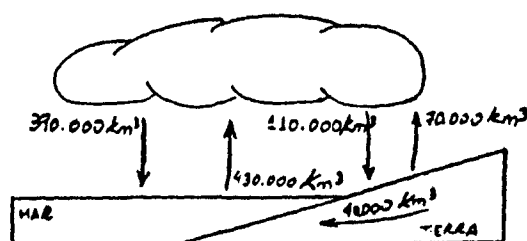


Figura 1.-

Teniendo en cuenta estos datos y el hecho de que el consumo de agua en países desarrollados asciende a 7.000 litros/día por persona, resulta evidente que el agua disponible es un bien escaso.

El agua de nuestro planeta no es un elemento de localización precisa y estática, sino que, generalmente, está transitoriamente en una de las etapas de un ciclo cerrado llamado ciclo hidrológico.

Cuando el agua de lluvia encuentra una zona de la superficie de la tierra permeable, se infiltra y desciende por gravedad hasta una zona impermeable que la retenga. A alguna profundidad el suelo o roca estará saturado de agua. La cima de la parte saturada se denomina superficie piezométrica, y el agua debajo de ella se denomina agua subterránea. Denominamos acuífero a -- cualquier estructura geológica subterránea susceptible de almacenar y transmitir agua subterránea.

Como consecuencia de la amplitud de su dominio, la Hidrogeología coincide con otras muchas ciencias como Geología, Hidrología, Química, Matemáticas y Física, es decir, es una ciencia interdisciplinaria. Por ello, el hidrogeólogo está obligado a utilizar las herramientas usuales de cada una de estas ciencias entre las cuales se halla siempre la informática en lugar destacado.

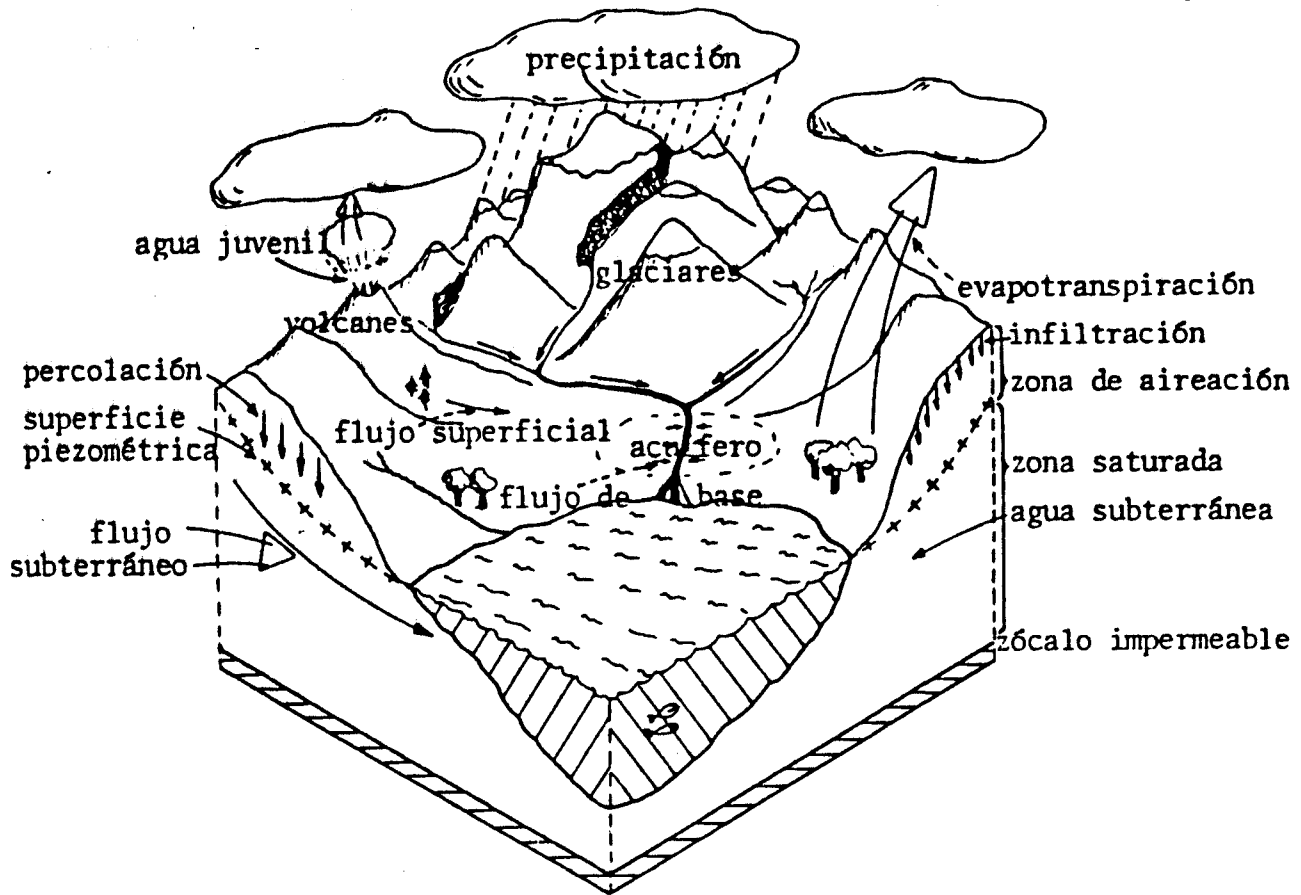


Figura 2.-

## 2. UNA APLICACION CONCRETA: LA GESTION CONJUNTA DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS Y SUPERFICIALES.

En cuencas hidrográficas donde se dan todas las etapas del ciclo hidrológico, el máximo beneficio puede obtenerse mediante la gestión conjunta, - lo que implica coordinar y planificar la explotación del agua superficial y subterránea para satisfacer unos objetivos preescritos. Estos objetivos son de tipo muy variado: económicos, legales, políticos, técnicos, etc.

Un diagrama del ciclo hidrológico particularizado para una cuenca en condiciones naturales es el que se muestra en la figura 3.

En él podemos observar que, de todos los elementos que lo componen, -- únicamente se efectúa una gestión sobre las aguas superficiales que fluyen - por la cuenca (esto es, los ríos) pero esto sólo supone, en la mayoría de -- los casos, una pequeña parte del agua disponible.

A veces, se utiliza en ciertas zonas el agua de los acuíferos, pero -- siempre de forma incontrolada, es decir, sin conocer en qué medida afecta es ta utilización al resto de los elementos de la cuenca, tanto a corto como a

largo plazo.

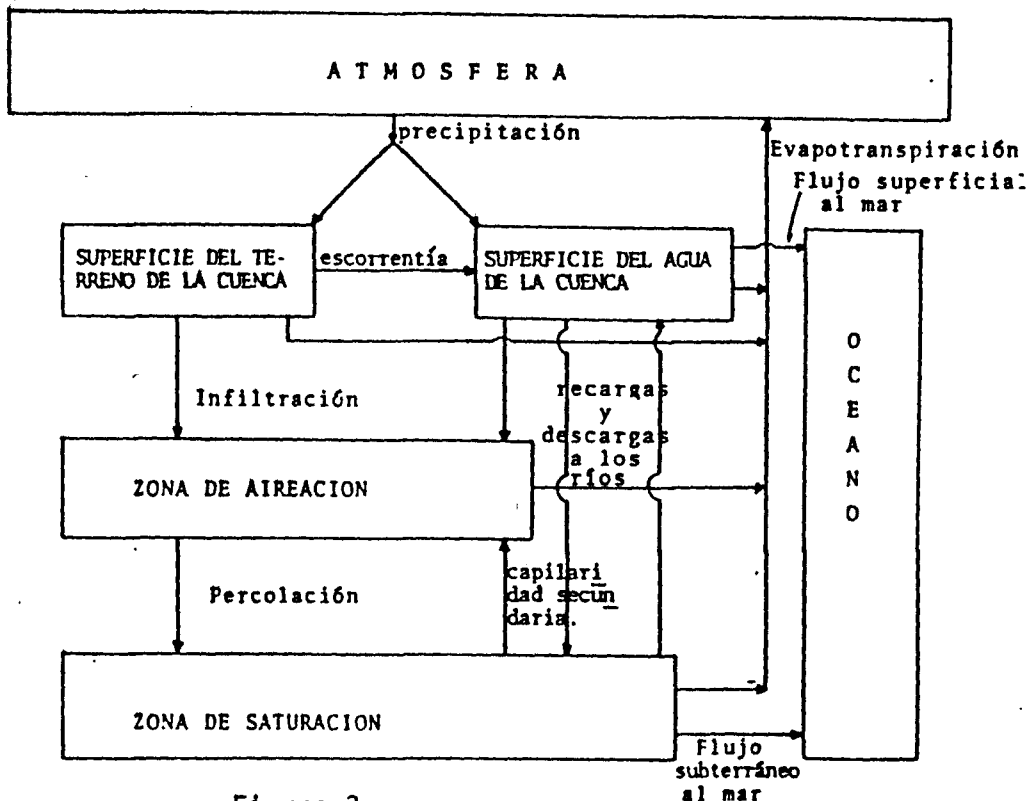


Figura 3.-

Sin embargo, dado que el agua es una materia prima renovable de forma natural, con una adecuada regulación del agua que entra en la cuenca y la que se obtiene de ella, las reservas pueden ser constantes indefinidamente.

Para administrar, pues, una cuenca es necesario un conocimiento del agua disponible y para este conocimiento se requiere la evaluación de los elementos constitutivos del ciclo hidrológico, implicados. Estos elementos pueden ser modelizados matemáticamente para efectuar su evaluación y así -- dar lugar a los modelos matemáticos en hidrogeología.

A nivel de cuenca existe siempre un balance entre el agua recibida y la que deja la cuenca. La ecuación del equilibrio hidrogeológico proporciona una cuantificación de este balance (unidades: volumen/unidad de tiempo).

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{APORTACION SUPERFICIAL + APORTACION SUBTERRANEA +} \\ \text{+ PRECIPITACIONES + AGUA IMPORTADA + DESCENSO EN} \\ \text{LAS RESERVAS SUPERFICIALES + DESCENSO EN LAS RE-} \\ \text{SERVAS SUBTERRANEAS.} \end{array} \right\} =$$

$$= \left\{ \begin{array}{l} \text{DESCARGA SUPERFICIAL} + \text{DESCARGA SUBTERRANEA} + \\ + \text{CONSUMO} + \text{AGUA EXPORTADA} + \text{ASCENSO EN LAS} \\ \text{RESERVAS SUBTERRANEAS} + \text{ASCENSO EN LAS RESER-} \\ \text{VAS SUPERFICIALES.} \end{array} \right\}$$

Esta ecuación representa el caso más general y no siempre en un caso particular tendremos presentes todos los términos. Con esta ecuación se puede evaluar el agua disponible en las condiciones naturales, actuales o previsibles futuras. A partir del conocimiento de todos los términos de la ecuación, se puede planificar la gestión de las reservas.

El uso conjunto está indicado para el caso de reservar superficiales - que fluyen, las cuales se pueden almacenar con una relación de transferencia óptima en acuíferos de la región. Así, las reservar superficiales (embalses) se dedicarán a satisfacer la mayoría de las necesidades normales de agua, -- mientras que las subterráneas se guardarán para cubrir necesidades en años - con pluviometría inferior a la normal. Por ello, los niveles de reservas de aguas subterráneas fluctuarán, estando bajos durante años secos y subiendo - como consecuencia de periodos húmedos.

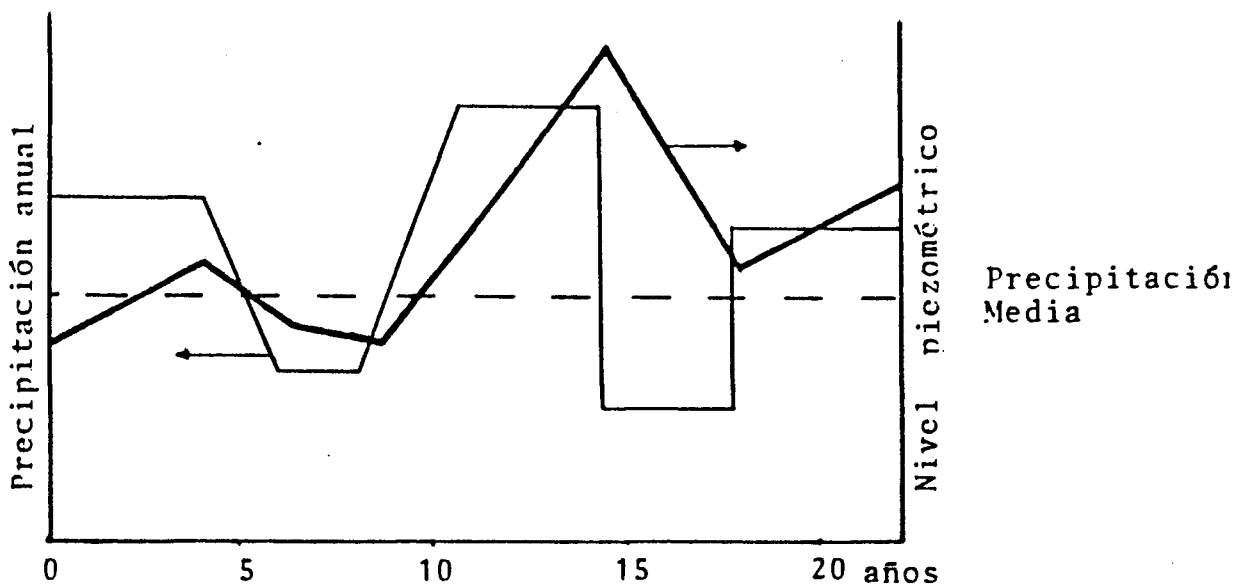


Figura 4.-

La gestión conjunta requiere capacidad física para realizar la distribución, la recarga artificial y para bombear. El procedimiento además requiere buena planificación para poder optimizar las disponibilidades. Estas operaciones necesitan personal muy experto en problemas de gestión hidrogeológica y una continua puesta al día de los datos del problema. Un diagrama esquemático de un tratamiento sistémico del uso conjunto es el siguiente (J.A.W. W,A, 1978):

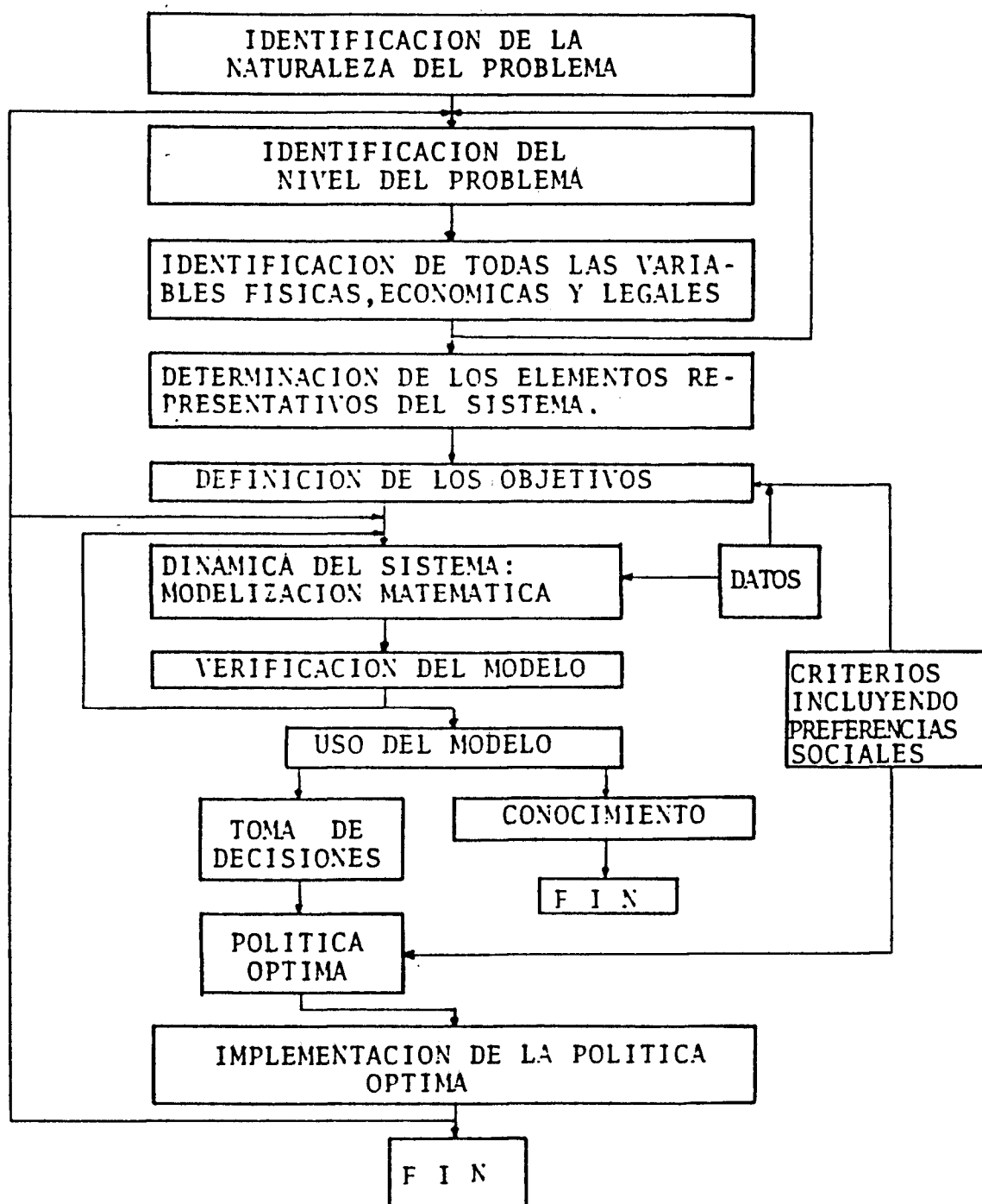


Figura 5.-

### 3. MODELOS MATEMATICOS EN HIDROGEOLOGIA.

El término "modelo matemático" tiene diferentes significados según la persona que lo utiliza. Aquí definiremos modelo matemático como "un sistema abstracto que interrelaciona, en un tiempo dado, una entrada, causa o estímulo de materia, energía o información y una salida, efecto o respuesta - de información, energía o materia".

Una vez determinado lo que se entiende por modelo matemático podemos estudiar los diferentes modelos o submodelos que pueden integrar un estudio completo de la evaluación y gestión conjunta de los recursos de agua en una cuenca, si procedemos según el esquema de la figura 5.

En el diagrama de la figura 6 están representadas todas las fases que lleva el tratamiento, así como la interrelación entre ellas, sea por motivos políticos o físicos.

Nos centraremos únicamente en los modelos que implican evaluación del agua y los modelos de optimización, dejando al margen los modelos socio-político-económicos y la determinación de las necesidades de agua que para -- nuestros modelos, supondremos conocidos.

Dentro de los modelos de evaluación consideraremos tres fases: fase - de tierra, redes de ríos y canalizaciones y fase subterránea.

- La fase de tierra comprende el agua superficial que penetra en el suelo y el agua que fluye por la superficie como escorrentia superficial y que no - se canaliza en ninguna forma. Aquí hay procesos de sedimentación, erosión y arrastre de materia química y biológica. Cada uno de estos aspectos estará afectado por características del terreno tales como: vegetación, lluvias, topografía, usos del suelo y otros.

- La fase de río representa todos los procesos relacionados con los ríos y sus aportaciones. En estos existen procesos de arrastre de partículas por - la corriente, transporte de sedimentos y deposición. Se consideran por tanto los procesos físicos, químicos y biológicos dentro del río.





- La fase de embalse se define como un almacenamiento, artificial o natural, de agua superficial e incluye lagos, embalses y tanques de almacenamiento. Los procesos a considerar son la deposición de sedimentos; las aportaciones descargas, circulación e intercambio en el almacenamiento; estratificación térmica y corrientes de convección; y los cambios en la calidad química y procesos biológicos del agua estancada.

- La fase de agua subterránea representa los procesos relacionados con el agua que se mueve o almacena bajo la superficie de la tierra. Estos procesos incluyen la aportación y descarga en la zona subterránea, los procesos de flujo dentro de la zona, la contaminación natural o artificial y la purificación del agua en esta zona.

Cada una de estas fases interacciona en algún modo con las restantes. La fase tierra divide el agua en agua de ríos y agua subterránea. La fase subterránea permite al agua volver a la fase de río por intercambios en el flujo subterráneo. La fase de río suministra la aportación para la fase de embalse y recibe asimismo descargas y desagües de esta fase. La humedad de la atmósfera también interfiere con las otras fases en forma de evaporación o transpiración.

En el análisis del modelo global es posible estimar la cantidad de agua disponible para el uso, y la magnitud y posible frecuencia de situaciones extremas tales como inundaciones, sequías o polución del agua.

Hay que tener en cuenta que la evaluación de estos aspectos cuantitativos de nuestras aguas depende completamente de como se han medido los procesos clave dentro de la cuenca, tales como lluvia, corriente, transporte de sedimentos, calidad química, temperatura y recuento de especies biológicas. En la definición del problema supondremos que esta información está disponible. En cualquier caso, existen métodos para procesar matemáticamente estos datos y con ello mejorar la fiabilidad de la información de partida.

El desarrollo completo de cada una de las etapas que implica la investigación asociada a la hidrogeología, está determinado por factores prácticos de índole variada. Entre estos factores se incluyen los ordenadores y periféricos (hardware), y los lenguajes de programación y librería de programas (software) accesibles a los investigadores.

En lo que respecta al "software", se puede afirmar que casi todos los modelos hidrogeológicos que existen en el mercado, están escritos en lenguaje de alto nivel: FORTRAN, ALGOL, PASCAL, PL/1, BASIC, etc, salvo los destinados a miniordenadores que utilizan los específicos de los mismos.

Pasamos a continuación a realizar una somera descripción de los programas de ordenador para cada una de las fases antes detalladas, todos ellos -- pertenecientes a la biblioteca de programas de División de Aguas Subterráneas del IGME e implementados en el ordenador del Departamento de Cálculo Numérico e Informática a través de un convenio entre nuestro Departamento y la División antes citada.

Para no alargar demasiado esta exposición, en cada programa se especificará únicamente el método empleado sin entrar en detalles matemáticos de cada uno.

### 3.1. Programas generales de tratamiento de datos hidrológicos.

#### 3.1.1. Programas para contraste y restitución de series hidrológicas.

Estos programas consisten en una comparación de series hidrológicas entre distintas estaciones o puntos de toma de datos. El objeto es que el usuario observe las gráficas de la evolución de las estaciones de dos en dos y -- puedan detectarse estaciones con series erróneas, pudiendo entonces restituirse los datos en aquellas series que carezcan de algunos.

Las series hidrológicas de las estaciones pueden ser precipitaciones, caudales etc. a lo largo de un cierto período de tiempo.

Disponemos de dos programas que realizan este tipo de cálculo.

- Programa DOBLES-MAS que realiza esta comparación por el método de las Dobles-masas.
- Programa CORRE-ORTO, que lo hace por el método de correlación ortogonal.

### 3.1.2. Programas para ajustes a funciones de distribución y funciones de densidad.

Estos programas dada una serie hidrológica, calculan la función que mejor se le ajusta del tipo que se desee.

La serie hidrológica puede ser de precipitaciones, caudales, etc., a lo largo de un período de tiempo dado.

Los ajustes de que se dispone son los siguientes:

- Programa GUMBEL, ajusta a la serie dada la función de GUMBEL.
- Programa GOODRICH, ajusta a la serie dada la función de GOODRICH
- Programa LOG-NORMAL, ajusta a la serie dada una función logarítmico-normal.
- Programa MARQUAR, ajusta a la serie dada una función del tipo que desee el usuario, mediante el algoritmo de Marquardt.

### 3.2. Programas de modelos atmosféricos.

#### 3.2.1. Programas para análisis de temperaturas.

Se dispone del programa RETEM que genera información de temperaturas mensuales en un año dado en estaciones, a partir de datos del mismo mes en la misma estación para otros años, esto es, restituye series de temperaturas en una estación.

Este programa servirá de apoyo para cálculos posteriores de evapotranspiración cuando se necesiten datos de temperaturas.

#### 3.2.2. Programas de análisis de pluviometría.

Existen dos programas de análisis pluviométricos.

- Programa REPLU.

Realiza un análisis completo de las series pluviométricas de todas las estaciones que se deseen de una misma cuenca, a lo largo de un número de años dado.

Tomando una serie de estaciones como estaciones base, ajusta sus datos a una distribución normal y a partir de éstas, completa los datos del resto de estaciones en las que su serie esté incompleta. Asimismo, realiza correlaciones ortogonales y de dobles-masas si se desea, es decir, se apoya en programas ya descritos.

- Programa THIESSEN.

Este calcula la lluvia mensual en estaciones de aforo en meses de - - años de un período dado a partir de lluvias de pluviómetros asignados a estaciones de aforos.

### 3.2.3. Programas para el cálculo de la evapotranspiración.

Existen varios métodos para al cálculo de la evapotranspiración del -- agua en un terreno.

#### Cálculo evapotranspiración según THORNWAITE.

Este método calcula la evapotranspiración potencial a partir de la precipitación y temperatura mensuales, latitud del punto que se considera y una o varias hipótesis para el agua ya existente en el terreno.

Hay dos programas que aplican este método.

- Programa BALANCE
- Programa ETP-THORN
- Programa THORNTWA

#### Cálculo evapotranspiración según TURC-COUTAGNE

Este método consiste en el cálculo de la evapotranspiración real anual a partir de la precipitación anual y la temperatura media anual.

Este cálculo lo realiza el programa TURC-COUTA.

### -Cálculo evapotranspiración según BLANEY-CRIDLE

A partir de la temperatura media mensual, la precipitación mensual y el porcentaje de cada tipo de cultivo, este método deduce la evapotranspiración real anual.

Programas que lo aplican.

- Programa ETB-BL-CR
- Programa BALANCE

### 3.3. Programas de modelos para fase de tierra.

No se dispone por el momento de programas específicos sobre modelos de sedimentación y erosión ni sobre modelos de calidad superficial, ni tampoco están éstos incluidos en los modelos globales que veremos posteriormente por no considerarse de interés decisivo en la simulación conjunta.

#### 3.3.1. Programas de modelos de escorrentía superficial.

Los programas que veremos en este apartado no son propiamente de escorrentía superficial sino algo más general que nos permite a un tiempo calcular la escorrentía superficial y la infiltración de agua al subsuelo, que serán a su vez datos para las fases de río y agua subterránea respectivamente.

Programas existentes:

- Programa RECAU

Genera aportaciones de agua a partir de datos de lluvia homogeneizados por el programa THIESSEN.

- Programa CLIMA2

Calcula lluvia útil por pluviómetro utilizando las reservas fijas calculadas previamente en CLIMA1.

- Programa BAHIMED.

Genera aportaciones anuales útiles a partir de las diversas aportaciones de la cuenca.

Este programa también se encadena con el programa RECAU.

- Programa CLIMA1.

Calcula la reserva del suelo para cada pluviómetro y período hidrológico determinado mediante la utilización de datos que corresponden a meses del año medio y que serán tomados de otros programas.

La información necesaria es:

- Lluvia mensual del año medio para todos los pluviómetros. Tomada del programa REPLU.

- Componentes pluviométricos por estación de aforo. Tomados del programa - - THIESSEN.

- Aportación útil en la intercuenca. Tomada del programa BAHIMED.

Como se puede observar todos estos programas se encadenan unos con - - otros así como con los de la fase atmosférica, lo cual es lógico pues siempre, a medida que vamos avanzando en grado de complejidad en la cuenca hidrográfica, nos van a venir aportaciones de fases anteriores que dependerán - - pues de los anteriores parámetros. Poco a poco iremos construyendo un modelo completo o global de la zona de captación si en lugar de considerar un conjunto de programas consideramos que todos forman un solo programa de estructura modular.

### 3.4. Programas de modelos para la fase de río.

Tampoco en este caso se dispone de programas específicos de sedimentación, arrastre y transporte ni de calidad en ríos, tratados estos como unidades independientes. Existen programas de control de calidad que se incluirán en la fase de asesoramiento.

#### 3.4.1. Programas de modelos de redes de canales.

Estos programas no existen aislados, pues no se obtiene con ellos ninguna información útil al usuario. Sin embargo, son primordiales para el tratamiento del modelo completo de la zona de captación y por tanto son siempre subprogramas incluidos dentro del programa conjunto.

En ellos, básicamente, se genera la red de canales: ríos y demás elementos de que consta la zona completa, para poder luego estudiar las interferencias entre cada uno de estos elementos y realizar un balance global.

#### 3.4.2. Programas de cálculos de aportaciones.

- Programa HIDRO, calcula primero las aportaciones naturales en función de las aportaciones aforadas y a partir de las naturales, descompone este hidrograma de caudales naturales en aportación superficial y aportación subterránea. Asimismo este programa necesita datos del programa RECAU.

- Programa MOLINET, para cálculo del caudal aforado del río con molinete, a partir de las revoluciones, tiempo, distancias de las verticales, profundidades y la ecuación del molinete.

### 3.5. Programas para la fase de embalse.

Como hemos dicho antes, tampoco existen para este caso modelos de sedimentación, transporte y deposición ni modelos de calidad en embalses propiamente dichos. Esta se contempla con la casuística general.



- Programa CLIMA2

Calcula lluvia útil por pluviómetro utilizando las reservas fijas calculadas previamente en CLIMA1.

- Programa BAHIMED.

Genera aportaciones anuales útiles a partir de las diversas aportaciones de la cuenca.

Este programa también se encadena con el programa RECAU.

- Programa CLIMA1.

Calcula la reserva del suelo para cada pluviómetro y período hidrológico determinado mediante la utilización de datos que corresponden a meses del año medio y que serán tomados de otros programas.

La información necesaria es:

- Lluvia mensual del año medio para todos los pluviómetros. Tomada del programa REPLU.

- Componentes pluviométricos por estación de aforo. Tomados del programa - - THIESEN.

- Aportación útil en la intercuenca. Tomada del programa BAHIMED.

Como se puede observar todos estos programas se encadenan unos con - - otros así como con los de la fase atmosférica, lo cual es lógico pues siempre, a medida que vamos avanzando en grado de complejidad en la cuenca hidrográfica, nos van a venir aportaciones de fases anteriores que dependerán - - pues de los anteriores parámetros. Poco a poco iremos construyendo un modelo completo o global de la zona de captación si en lugar de considerar un conjunto de programas consideramos que todos forman un solo programa de estructura modular.

Asimismo los modelos de almacenamiento superficial están en general, integrados en los modelos globales de zona de captación.

Sin embargo existen programas especiales para tratamientos de embalses cuando estos presentan problemas a la hora de desagües. Estos programas, aunque pueden considerarse en sí mismos una unidad, formarán parte del programa global si es preciso.

### 3.5.1. Programas para modelos de embalses.

- Programa ROENA. Este programa realiza una simulación para la definición de reglas operativas de embalses mediante números adimensionales. El programa - proporciona un criterio de actuación cuando existen dos embalses en paralelo que tienen que satisfacer una demanda común.

### 3.6. Fase de agua subterránea.

Por ser esta la parte más compleja del estudio, tanto física como matemáticamente y dada la inaccesibilidad de ciertas mediciones, es la que tie--ne un mayor desarrollo, en cuanto a modelos se refiere. Estos simulan el comportamiento de las reservas de agua subterránea, tanto en el aspecto de flu--jo de agua como en el de calidad. Es sin duda esta simulación el paso más importante de la Informática en la Hidrogeología.

#### 3.6.1. Programas de modelos de almacenamiento subterráneo en acuíferos.

Programas para predicción de caudales de manantiales.

- Programa MEDA.

Este modelo calcula los caudales de un manantial, que serán aportacio--nes de agua subterránea a un río o a la fase de tierra, en función de las --precipitaciones de la zona.

Parte de una serie de caudales en tiempo anterior y otra serie de pre--cipitaciones. Si en los caudales influyese la nieve sería necesaria también - una serie de temperaturas.

## Programas de modelos de flujo.

Simulan el flujo subterráneo, mostrando las variaciones de piezometría, según las hipótesis de bombeos y recargas.

Los datos de partida son:

- Geometría del acuífero.
- Parámetros hidrogeológicos (K,T)
- Bombeos y recargas en cada celda.
- Relaciones río-acuífero.
- Piezometrías iniciales.

Los modelos de flujo disponibles los clasificamos en los siguientes grupos:

### 1) Modelos por diferencias finitas.

- Bidimensionales
- Tridimensionales

### 2) Modelos en elementos finitos.

#### 1) Modelos por diferencias finitas:

##### - Modelos Bidimensionales

Autor	Nombre Progr.
R.A. PRICKETT	SIMULBAS
C.G. LONNQUIST	
R.A. PRICKETT	SIMACUINF
C.G. LONNQUIST	
P.C. TRESCOTT	TRESCDIND
G.F. PINDER	
S.P. LARSON	
TRESCOTT-L.VIRGOS	TRESCOT2

- Modelos tridimensionales.

Autor	Nombre Prog.
PRICKETT	PRI 34
P.C. TRESCOTT	TRESCTRID
G.F. PINDER	
S.L. LARSON	
M.G. McDONALD y	MODFLOW
A.W. HARBAUGH	

Modelos simplificados.

Son modelos bidimensionales preparados para trabajar en pequeños ordenadores o para realizar investigaciones sobre la calibración automática de modelos de MIDO.

2) Modelos de elementos finitos.

Se dispone de modelos bi y tridimensionales preparados para calculos de problemas de flujo en acuíferos libres, confinados ó semiconfinados.

- Modelos bidimensionales.

Autor	Nombre Prog.
F.J. ELORZA	HIDROG 2
L. FERRAGUT	MINIMEF-HIDROG
F.J. ELORZA	

- Modelos bi y tridimensionales.

CLUB MODULEF	MODULEF
--------------	---------

Estos modelos tienen la ventaja de ser encadenables con modelos de -- contaminación de una forma inmediata.

### 3.6.2. Programas para temas de pozos.

- . Programas de análisis de ensayos de bombeo.

Se cuenta con una biblioteca de programas para analizar por los métodos de Theiss ó Jacob los resultados de los ensayos de bombeo.

- . Programa para cálculo de interferencias entre pozos.

Se ha desarrollado el programa DESCENSOS destinado a calcular los efectos de un campo de pozos sobre un punto cualquiera del campo. Utiliza el método de los deltas de Kernel.

- . Programas para la interrelación acuífero-río.

Se calcula la detracción sufrida en el aporte de un acuífero a un río - como resultado del bombeo en un punto cualquiera del acuífero.

- Programa GLOVER-JENKINS
- Programa BOUSSINESQ
- Programa SAHUQUILLO

### 3.6.3. Programas para modelos de calidad subterráneos.

Simulan las concentraciones de contaminantes, conociendo el flujo subterráneo y los parámetros de dispersión.

- CELDASMEZ

Modelo de celdas de mezclas. Michael Campana.

- ODGMTM 1.

El programa es una solución analítica al modelo unidimensional de transporte de masa en agua subterráneas. (Dominio semi-infinito). R.W. Cleary.

- ODGMTM 2.

Modelo igual al anterior solo que se pueden imponer condiciones de contorno de tipo mixto. R.W. Cleary.

- TDGMTM 1.

Solución analítica del modelo bidimensional de transporte de masa en agua subterránea. (Condición de contorno tipo franja, es decir ancho limitado) R.W. Cleary.

- TDGMTM 2.

Idem anterior, solo que tiene como condición de contorno franja de ancho ilimitado. R.W. Cleary.

- TDGMTM 3.

Solución analítica de un modelo bidimensional de transporte de masa - en agua subterránea, con fuente contaminante con distribución Gaussiana. Ancho infinito. R.W. Cleary.

- THDGMTM 1.

Solución analítica del modelo tridimensional de transporte de masa en agua subterránea. Fuente contaminante rectangular. Acuífero de ancho y profundidad finitas. R.W. Cleary.

- THDGMTM 2.

Solución analítica del modelo tridimensional de transporte de masa en agua subterránea. (Fuente contaminante con distribución bivariable gaussiana. Acuífero de ancho y profundidad infinitas) R.W. Cleary.

- TRANSOL1.

Solución numérica al problema del transporte y dispersión de soluto en agua subterránea. J.D. Bredehoeft y L.F. Konikow.

- WATEQF.

Modelo de calidad por balance de masas. N. Plummer, Trudell y Jones.

- F-PATH.

Trayectorias del flujo contaminante con representación gráfica. MIDO.

- S-PATHS.

Trayectorias de flujo contaminante.

- SUTRA

Modelo por elementos finitos de transporte en agua subterránea de soluto o energía tanto en regimen saturado como no saturado. C.I. Voss.

3.7. Programas para modelos de asesoramiento.

Una unión de los resultados de los programas expuestos hasta el momento podría proporcionarnos ya un balance total del agua suministrada y una evolución de la zona, como para estar en condiciones de predecir situaciones anormales o no deseables. Sin embargo existen programas específicos para ayuda en este asesoramiento.

3.7.1. Programas para cálculo de agua total.

- Programa BAHID.

A partir de aportaciones de distinta naturaleza, elabora un balance hidrológico de toda la cuenca en cuanto a aportaciones se refiere, sean superficiales o subterráneas.

3.7.2. Programas para calidad del agua.

- Programa ANALIS.

Para tratamiento de análisis de aguas. A partir de los datos de análisis en p.p.m. calculan miliequivalentes, errores de balance, relaciones iónicas, índices, correlaciones, diagrama de Piper y diagrama de Stiff.

- Programas para informatización de análisis químicos.

Realiza un tratamiento estadístico de puntos seleccionados, obteniéndose evoluciones temporales de diversos compuestos, y ajustándoles una recta de regresión y un polinomio de 3<sup>er</sup> grado. Se pueden efectuar predicciones de evolución en años futuros.

3.8. Programas para modelos de optimización.

Como se ha venido diciendo a lo largo de la exposición, estos están también incluidos en algunos de los programas de uso conjunto o modelos globales. En cualquier caso, conviene señalar que la optimización de estos resultados - es relativamente compleja dada la gran variedad y cantidad de variables que -

intervienen en el proceso ya que a todas las que hemos tratado hasta ahora - habría que añadir las de tipo socio-político económico y eso hace que se - - tienda hacia modelos que no realicen la optimización por ellos mismos, o al menos no en la mayor parte de las variables y que sea el usuario quien dictamine, mediante sucesivas simulaciones, el caso más favorable, considerando todos los aspectos.

De todas formas existen programas de ayuda al usuario en la visualización de resultados y toma de decisiones.

- Programa CURVREGU.

Calcula la curva Regulación-Garantía de un embalse a partir de las - - aportaciones y demandas mensuales.

### 3.9. Modelos completos.

Estos son modelos que engloban, no solo todos o algunos de los submodelos ya vistos, sino lo que realmente es interesante que son las interacciones entre los diversos elementos de la zona.

Como acabamos de ver, estos pueden llevar incluida optimización automática o manual de los recursos hídricos.

Los diversos modelos estarán constituidos por elementos tipo como se - muestra en la figura 7 y sus interrelaciones. En líneas generales, lo que - hacen ~~es~~ realizar un balance, teniendo en cuenta todos los elementos de una cuenca completa.

Las diferencias entre unos y otros se establecen en la forma de definir la unidad elemental de estudio que puede ser una célula como la que se muestra en la figura (modelos REGA) que puede o no contener todos estos elementos, o bien nudos tipo (otros modelos).

Asimismo difieren en el tipo de modelo de acuífero incluido en el programa y por tanto en la relación río-acuífero, pudiendo los programas REGA llevar o bien un modelo en diferencias finitas, elementos finitos, o bien un modelo simplificado tipo Glover-Jenkins.



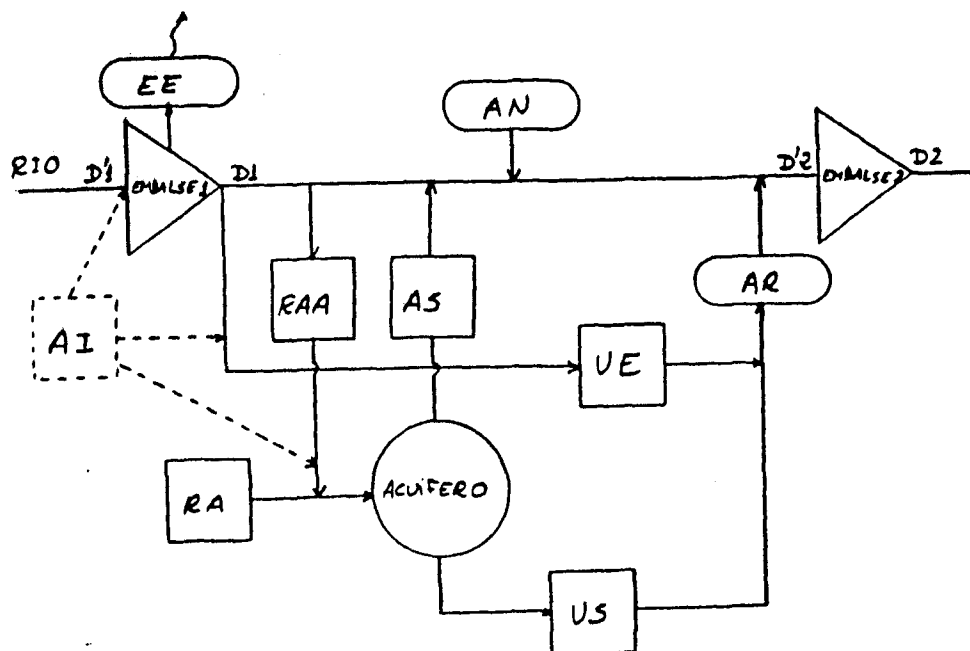


Fig. 7

EE - Evapotranspiración  
 AN - Aportación natural  
 AS - Aportación subterránea  
 AR - Aportación de retorno  
 RAA - Recarga artificial del acuífero  
 RA - Recarga natural del acuífero  
 AI - Aportación importada

UE - Usos de agua superficial  
 US - Usos de agua subterránea  
 D' - Disponibilidad (entrada)  
 D - Disponibilidad (salida)

También los modelos tipo REGA optimizan el reparto de agua para conseguir menor déficit mientras que otros realizan simulaciones con las hipótesis deseadas por el usuario.

La filosofía general de todos estos modelos es intentar cubrir las necesidades de agua, con el agua superficial y cuando esto no es posible proceder a bombear agua de los acuíferos, observando como mejora la garantía de suministro de agua en los puntos de consumo.

Una relación de los programas existentes sería.

Programa REGAIGME  
 Programa REGAPRIOR  
 Programa GEST01  
 Programa GEST02  
 Programa COMBI  
 Programa COMUNI

#### 4. BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA.

- BEAR, J. "Hydraulics of groundwater". McGraw-Hill (1978).
- DAVIS, S.H. & de WEIST, R.J. "Hidrogeología". Ed. Ariel (1971).
- FLEMING, G. "Computer simulation techniques in hydrology". Ed. Elsevier (1975).
- HUYAKORN, P.S. & PINDER, G.F. "Computational methods in surface flow". Ed. Academic Press (1983).
- IGLESIAS LOPEZ, A. "La utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas como paliativo de la sequía". I.G.M.E. (1983).
- MAKNOON & BURGESS "Conjunctive use of ground and surface water" J.A.W.W.A. (1978).
- PEREZ ALONSO, M.P. y ELORZA TENREIRO, F.J. "Métodos matemáticos en hidrogeología" U. de Oviedo (1984).
- TODD, D.K. "Groundwater Hydrology". Ed. John Wiley & Sons (1980).
- WANG, H.F. & ANDERSON, M.P. "Introduction to groundwater modeling". Ed. W.H. Freeman (1982).

**HIDROQUIMICA**

**Margarita Gómez Sánchez**  
**Lda. C. C. Geológicas**

# INDICE

	<u>Págs.</u>
1.- INTRODUCCION .....	1 (128)
2.- CARACTERISTICAS FISICAS Y ORGANOLITICAS DEL AGUA .....	3
2.1.- EL AGUA COMO SUSTANCIA QUIMICA PURA .....	3
2.2.- ESPECIES MOLECULARES DEL AGUA .....	3
2.3.- PROPIEDADES FISICAS DEL AGUA .....	4
3.- CARACTERISTICAS QUIMICAS Y FISICO-QUIMICAS DEL AGUA ..	9
4.- PRINCIPALES IONES EN DISOLUCION-ORIGEN Y PROPIEDADES GEOQUIMICAS DE LAS SUSTANCIAS DISUELTAS .....	13
4.1.- IONES FUNDAMENTALES .....	15
4.2.- PRINCIPALES GASES DISUELTOS .....	21
4.3.- IONES SECUNDARIOS .....	23
5.- FENOMENOS MODIFICADORES DEL QUIMISMO DEL AGUA SUBTERRA NEA .....	26
5.1.- INTERCAMBIO IONICO .....	26
5.2.- FENOMENOS DE OXIDACION-REDUCCION O REDOX .....	27
5.3.- CONCENTRACIONES Y PRECIPITACIONES .....	28
5.4.- REDUCCION DE SULFATOS Y DE HIERRO .....	28
6.- EVOLUCION GEOQUIMICA DEL AGUA EN LOS ACUIFEROS DE ESTU DIO .....	30
7.- TOMA DE MUESTRAS DE AGUA .....	33
8.- REPRESENTACION DE LAS CARACTERISTICAS HIDROQUIMICAS ..	35
8.1.- BALANCE DE ANIONES Y CATIONES EN ANALISIS QUIMI COS-ERRORES .....	35
8.2.- REPRESENTACIONES GRAFICAS DE LAS CARACTERISTICAS QUIMICAS DE UN ANALISIS DE AGUA Y SU UTILIDAD ..	36
9.- NORMAS DE POTABILIDAD-CRITERIOS DE CALIDAD PARA USO HU MANO, AGRICOLA E INDUSTRIAL .....	41
9.1.- CONCEPTO DE POTABILIDAD .....	41
9.2.- CODIGO ALIMENTARIO ESPAÑOL .....	42
9.3.- CALIDAD PARA USOS AGRICOLAS, GANADEROS E INDUS- TRIALES .....	43

## 1.- INTRODUCCION

La naturaleza físico-química del agua, su abundancia y distribución hacen que esta especie química, sea la más importante de todas las conocidas, ya que se la puede considerar como la base de la vida, pues sin su presencia y sus propiedades particulares, esta sería imposible sobre la Tierra. Algunas de estas particularidades son:

- a) Debido a sus temperaturas de solidificación y vaporización, es la única sustancia que se encuentra de forma natural en los tres estados.
- b) Tiene un papel vital en el desarrollo de los seres vivos, siendo su componente mayoritario.
- c) Es la sustancia portadora de nutrientes.
- d) Es el medio universal, en que se realizan las reacciones organobiológicas.
- e) En su seno se producen muchos procesos geoquímicos.
- f) Su calidad condiciona la calidad de los alimentos.
- g) Ejerce gran influencia en el desarrollo de la agricultura, la industria, las fuentes de energía, etc...
- i) Gran número de compuestos toman el estado coloidal a su contacto.
- j) En la materia, el agua se presenta de diferentes formas:

- Agua de constitución (unión química).
- Agua de hidratación o de cristalización (unión físico-química de los cristales).
- Agua de imbibición, interposición o inserción (zeolítica).
- Agua de absorción o de humidificación.
- Agua combinada fisiológicamente.

La química del agua, comenzó a desarrollarse en el momento en que se establecieron las bases del análisis químico cuantitativo, en el siglo XIX. Sin embargo no se suelen encontrar datos de confianza sobre aguas naturales, anteriores a 1.900 y correspondiendo en gran parte a aguas minerales y termominerales.

En el momento actual el análisis de un agua, es una labor normal y sencilla, pudiéndose determinar incluso trazas o sustancias en pequeña cantidad, con rapidez y precisión.

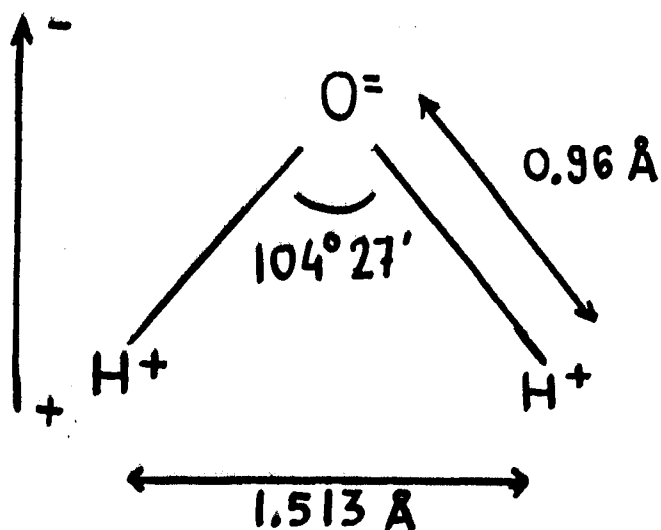
El objetivo fundamental de esta clase, es dar los principios básicos de química del agua, aplicados a las aguas subterráneas y la valoración de los análisis químicos.

## 2.- CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y ORGANOLÍTICAS DEL AGUA

### 2.1.-EL AGUA COMO SUSTANCIA QUÍMICA PURA

La molécula de agua está formada por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno:  $H_2O$ . Se trata de una molécula, formada por enlaces covalentes, cuya forma es similar a una V; la naturaleza polar de los enlaces O-H,

se presenta como consecuencia de la distribución asimétrica de las cargas (con un ángulo  $\widehat{HOH} = 104^\circ 27'$ , y unas distancias entre los núcleos  $OH = 0,96 \text{ \AA}$ ,  $H-H = 1.513 \text{ \AA}$ ), y como resultado de un momento dipolar alto que se encuentra dirigido según la bisectriz del ángulo  $\widehat{HOH}$ .



Este momento dipolar, crea fuerzas atractivas intermoleculares que originan una tendencia a asociarse entre sí con gran fuerza, las moléculas de agua.

### 2.2.- ESPECIES MOLECULARES DEL AGUA

El hidrógeno natural, está formado, por la mezcla de los dos isóto-

pos estables, que de él existen en la naturaleza.

<u>Isótopos</u>	<u>Número de masa</u>	<u>Abundancia isotópica</u>
$^1\text{H}$	1	99,985
$^2\text{H}$ (deuterio)	2	0,01492

También el oxígeno natural, es mezcla de otros tres isótopos estables.

$^{16}\text{O}$	16	99,7590
$^{17}\text{O}$	17	0,0374
$^{18}\text{O}$	18	0,2039

En el agua ordinaria, las cuatro especies isotópicas mayores se encuentran en la proporción molecular siguiente:

$$^1\text{H } ^{16}\text{O} / ^1\text{H}_2 ^{18}\text{O} / ^1\text{H}_2 ^{17}\text{O} / ^1\text{HD } ^{16}\text{O} = 997.280 / 2.000 / 400 / 320$$

El  $^1\text{H}$  y  $^2\text{H}$  son estables, mientras que el  $^3\text{H}$  es radiactivo con una vida media de 12,6 años.

### 2.3.- PROPIEDADES FISICAS DEL AGUA

El agua hasta el descubrimiento de los isótopos de hidrógeno y oxígeno, era considerada como una sustancia homogénea. Posteriormente se comprobó, que en realidad era una mezcla, en la que la cantidad relativa de los diversos constituyentes variaba en función de su origen, grado de pureza, etc.

Las sustancias que se encuentran disueltas en el agua (gases, líquidos o sólidos), pueden estar en forma molecular o en forma iónica, siendo en este último modo como fundamentalmente se encuentran en el agua subterránea. La concentración de los diferentes iones y sustancias disueltas se pueden expresar de distinta forma:



#### A) EXPRESIONES EN PESO

- . Partes por millón ppm: nº de gramos de una sustancia en un millón de gramos: mg/Kg.

Variantes - ppc - partes por cien mil.

ppb - partes por billón.

- . Miligramos por litro mg/l: miligramos de soluto por 1 l de disolución. Si la concentración total de sales no supera 5.000 ppm, la densidad del agua es aproximadamente 1, y por tanto 1 ppm = 1 mg/l (aunque el error es pequeño, hasta para el agua del mar).

También se emplea: g/l = 1.000 mg/l.

$$\mu\text{g/l} = 10^3 \text{ mg/l}.$$

#### B) EXPRESIONES QUIMICAS

Se sustituyen los pesos de las sustancias disueltas por el nº de moles o el nº de equivalentes.

$$\text{nº de moles} = \frac{\text{peso de sustancia}}{\text{peso molecular}}$$

$$\text{peso equivalente} = \frac{\text{peso molecular}}{\text{nº de electrones o valencias}}$$

$$\text{nº de equivalentes} = \frac{\text{peso de sustancia}}{\text{peso equivalente}}$$

- . Milliequivalentes por litro r, meq/l: coincide aproximadamente con los equivalentes por millón de gramos (epm) muy utilizados en los análisis químicos pues permite comparar directamente iones.
- . Normalidad: nº de equivalentes/l disolución.
- . Molaridad: moles/l disolución.

- . Molalidad: moles/Kg agua pura (tiene interés si en los procesos de estudio se producen cambios de densidad o variaciones importantes en el contenido en agua).

### Temperatura

El agua es un líquido entre 0° y 100° C, a presión atmosférica. Su calor específico es elevado (1 Cal/gr°C, que es el valor medio entre 0° y 100° C), así como sus calores de vaporización (540 Cal/gr a 1 atm.) y de congelación (80 Cal/gr).

Las aguas subterráneas tienen una temperatura muy poco variable, respondiendo a la media anual de las temperaturas atmosféricas del lugar, más el incremento debido al gradiente geotérmico (1° C - 33 m).

### Densidad

Se define como la masa de 1 l de agua.

La densidad del agua que es prácticamente 1 gr/cm<sup>3</sup> (0,9999) a 20°C, pasa por una anomalía a 3,98°C, ya que alcanza el mínimo volumen y máxima densidad, 1 Kg/l, siendo algo menos densa a 0°C. La densidad varía por tanto con la temperatura y crece con la salinidad:

1 gr/cm<sup>3</sup> - aguas dulces.

1.025 gr/cm<sup>3</sup> - agua del mar.

1,2 gr/cm<sup>3</sup> - salmueras.

### Conductividad y resistividad

La conductividad eléctrica, es la capacidad que tiene el agua de transmitir la electricidad a través de sí. Se mide como la conductividad que existe entre dos electrodos paralelos de 1 cm<sup>2</sup> cada uno y separados 1 cm, situados en el seno del agua a medir. Las unidades de medida son  $\mu$ S/cm o  $\mu$ mhos/cm.

La conductividad eléctrica del agua pura es baja ( $0,045 \mu\text{s/cm}$  a  $18^\circ\text{C}$ ), pero crece enormemente al contener pequeñas cantidades de impurezas, siendo un buen conductor eléctrico cuando contiene sustancias iónicas disueltas.

En aguas naturales, las variaciones de composición hacen que no exista una relación estrecha entre la conductividad y el residuo seco o contenido iónico; sin embargo esta correlación es bastante buena en aguas de composición química semejante (en aniones y cationes).

Valores de conductividad a $18^\circ\text{C}$ :	$100 - 2.000 \mu\text{s/cm}$ .	A. dulces.
	$45.000 \mu\text{s/cm}$ .	A. mar.
	$100.000 \mu\text{s/cm}$ .	Salmueras.

La resistencia eléctrica se define como la inversa de la conductividad:  $R = \frac{1}{C}$ .

### Color

Es la capacidad de absorber ciertas radiaciones del espectro visible. Se mide por comparación con un estándar arbitrario de  $\text{Cl}_3\text{Co} + \text{Cl}_6\text{PtK}_2$  en ppm de Pt-Co o simplemente de Pt. Las aguas subterráneas, presentan valores en general inferiores a 5 ppm de Pt.

### Turbidez

Es la dificultad de un agua para transmitir la luz. Mide el contenido en materias coloidales y la materia en suspensión. Se suele medir en ppm de  $\text{SiO}_2$ . Normalmente las aguas subterráneas tienen menos de 1 ppm de  $\text{SiO}_2$ .

### Materias en suspensión

Contenido en materiales sedimentables, que puedan ser retenidos por un filtro, se mide en ppm o  $\text{cm}^3/\text{l}$ . Las aguas subterráneas no suelen tener materiales en suspensión salvo en circulaciones kársticas, o en una captación mal desarrollada.

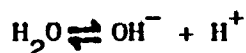
Sabor

Determinación organoléptica subjetiva, de interés en el agua potable; ya que por ejemplo las aguas con más de 300 ppm de  $\text{Cl}^-$  tienen gusto salado, los que tienen mucho  $\text{CO}_2$  libre, tienen gusto picante, etc.

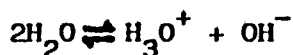
### 3.- CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS Y FÍSICO-QUÍMICAS DEL AGUA

#### PH

El agua líquida, es un cuerpo sólo débilmente iónico; estando sus moléculas parcialmente disociadas, de acuerdo con la reacción simplificada:



Sin embargo, los iones hidrógenos, no existen en solución sino que nada más formarse, se unen a una molécula de agua por medio de un puente de hidrógeno, para formar el ión hidroxonio  $\text{H}_3\text{O}^+$ , quedando:



Si aplicamos la Ley de Acción de Masas (Concentraciones molales):

$$K_w = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+][\text{OH}^-]}{[\text{H}_2\text{O}]} \quad K_w - \text{función de } T^\circ$$

Pero la concentración de los iones  $[\text{H}_3\text{O}^+]$  y  $[\text{OH}^-]$  es muy pequeña en relación con el agua sin disociar, por lo que se puede considerar que  $[\text{H}_3\text{O}^+][\text{OH}^-] = \text{cte. } K_{\text{H}_2\text{O}}$ .

El número de iones  $[\text{H}_3\text{O}^+]$  es igual al de iones  $[\text{OH}^-]$  en un agua neutra, y como para  $K_{\text{H}_2\text{O}}$  se ha encontrado un valor de  $\text{H}_2\text{O} = 1.008 \cdot 10^{-4}$  a  $-25^\circ \text{C}$ , tenemos que hay en un agua neutra  $10^{-7}$  iones hidronio e igual número

ro de iones hidróxilo.

Desde Sørensen se utiliza la notación del pH, para expresar la concentración de iones hidronio, y se define:

$$\text{pH} = -\log. [\text{H}_3\text{O}^+]$$

Para el agua pura a 25°C  $[\text{H}_3\text{O}^+] = [\text{OH}^-] = 10^{-7}$  iones  $\text{H}^+$ /l.

por tanto: pH = 7 medio neutro

pH < 7 medio ácido

pH > 7 medio básico

Las sustancias disueltas en el agua pueden alterar el equilibrio de disociación del agua, por tanto su pH.

El pH crece el 8%/°C, al crecer la temperatura por tanto se da referido a una temperatura (18° C o 25° C).

Los valores por lo general varían entre 6,5 y 8 (agua del mar).

El pH se determina en general electrométicamente, mediante un pH-metro con precisión de 0,1.

#### Residuo seco y total de sales disueltas, Rs y Sd

El residuo seco, es el peso de materiales resultante de evaporar 1 l de agua. El total de sales disueltas, mide el peso de todas las sustancias disueltas en el agua, sean o no volátiles, se mide en ppm o gr/l.

El total de sales disueltas difiere del residuo seco a 110° C o 180° C, en que se cuenta todo el  $\text{CO}_3\text{H}^-$  presente, el cual durante el calentamiento puede llegar a la precipitación, descomponiéndose en  $\text{CO}_3^{=}$  y  $\text{C O}_2$ . Aproximadamente  $\text{Sd} \approx \text{Rs} + \frac{1}{2} \text{CO}_3\text{H}^-$  en ppm.

Los valores de residuo seco son: 50-1.500 ppm. aguas dulces.

35.000 ppm. agua mar.

300.000 ppm. salmueras.

### Alcalinidades, TAC y TA

La alcalinidad, es la capacidad de un agua para neutralizar ácidos. La alcalinidad TAC, mide la capacidad hasta  $\text{pH} = 4,5$ , y la alcalinidad TA hasta  $\text{pH} = 8,3$ . Miden, ambas el contenido de aniones hidrolizables. Se miden en ppm. de  $\text{CO}_3\text{Ca}$  o meq/l ( $1 \text{ meq/l} = 50 \text{ ppm } \text{CO}_3\text{Ca}$ ) en grado francés, alemán, inglés y grado por galón americano:

$$1^\circ\text{F} = 10 \text{ ppm. } \text{CO}_3\text{Ca} = 1/5 \text{ meq/l.}$$

$$1^\circ\text{A} = 10 \text{ ppm. Ca O} = 17,8 \text{ ppm. } \text{CO}_3\text{Ca}$$

$$1^\circ\text{I} = 14,3 \text{ ppm. } \text{CO}_3\text{Ca}$$

$$1 \text{ gpg} = 17,14 \text{ ppm. } \text{CO}_3\text{Ca}$$

Los valores de TAC varían entre 100 y 300 ppm.  $\text{CO}_3\text{Ca}$ .

Los valores de TA entre 0 y 10 ppm.  $\text{CO}_3\text{Ca}$ .

### Dureza total, permanente y temporal o carbonatada, $D_t$ , $D_p$ , $D_c$

La dureza mide la capacidad de un agua para consumir jabón o producir incrustaciones. Las definiciones actuales se identifican con el contenido en iones alcalinotérreos, esencialmente  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ .

$$\text{Dureza total} = \text{contenido total en } \text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}.$$

Dureza permanente = contenido total en  $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$  después de la ebullición (precipitan carbonatos).

Dureza temporal o carbonatada = total de calcio y magnesio, asociados a  $\text{CO}_3\text{H}^-$  y  $\text{CO}_3^{=}$ .

$$D_t = D_p + D_c$$

Las unidades son las mismas que la alcalinidad.

En función de su dureza, las aguas se clasifican:

50 ppm. $\text{CO}_3\text{Ca}$ - aguas blandas	100 ppm $\text{CO}_3\text{Ca}$ - liger. duras.
100-200 ppm. " - moder. duras	200 " " - muy duras.

La dureza también incluye el efecto pequeño de  $\text{Sr}^{++}$  y  $\text{Fe}^{++}$ .

#### Demanda química de oxígeno o materia orgánica, DQO.

Es la capacidad de un agua para consumir oxidantes, en procesos químicos. Mide el contenido en materiales orgánicos oxidables, y en otras sustancias que consumen oxígeno como  $\text{Fe}^{++}$ ,  $\text{Mn}^{++}$ ,  $\text{NH}_4^+$ , etc... Se mide en ppm de  $\text{O}_2$  tomado del  $\text{MnO}_4\text{K}$ , a veces del  $\text{Cr}_2\text{O}_7\text{K}_2$ . Valores superiores a 100 ppm puede ser claro indicio de contaminación; pero valores entre 1-5 ppm de  $\text{O}_2$ .

#### Demanda bioquímica de oxígeno, DBO

Es la medida de la cantidad de oxígeno necesario para eliminar la materia orgánica contenida en un agua mediante procesos biológicos aerobios. Comúnmente se refiere a 5 días. Se mide en ppm de  $\text{O}_2$ . En aguas subterráneas por lo general tiene menos de 1 ppm. de  $\text{O}_2$ , valores más altos indican polución.



#### 4.- PRINCIPALES IONES EN DISOLUCION-ORIGEN Y PROPIEDADES GEOQUIMICAS DE LAS SUSTANCIAS DISUELTAS

El agua, es una sustancia químicamente muy activa, que tiene gran facilidad para disolver y reaccionar con otras sustancias tanto inorgánicas como orgánicas. Su poder ionizante, y su alta constante dieléctrica, hace que entre a formar parte de la composición de muchas sustancias, y que ataque a muchas otras directamente o bien a través de las sustancias que lleva disueltas (hidrólisis, oxidaciones, etc.).

El agua subterránea, procede de la infiltración del agua de precipitación en el subsuelo con una composición inicial que obedece a una serie de sustancias disueltas adquiridas a su paso por la atmósfera, pero en pequeñas cantidades, no siendo constantes los porcentajes y la composición ya que dependerá del lugar de la precipitación.

La lluvia por tanto aporta sales que pasan al terreno con la infiltración, este agua ocupará parcial o totalmente los poros del suelo.

TABLA 1.- Composición del agua de lluvia, concentración en mg/l.

	<u>GENERAL</u>	<u>MADRID</u>	<u>MADRID</u>
	(a)	(b)	(c)
$\text{HCO}_2^-$	2-3	nd	24-66
$\text{SO}_4^-$	0,5-3,7	15-60	1-27
$\text{Cl}^-$	0,2-4,4	3-12	3-14
$\text{NO}_3^-$	nd	nd	0-93

	<u>GENERAL</u>	<u>MADRID</u>	<u>MADRID</u>
	(a)	(b)	(c)
Ca <sup>++</sup>	0,0-1,2	nd	4-32
Mg <sup>++</sup>	0,1-0,5	nd	2-5
Na <sup>+</sup>	0,4-2,5	nd	1-25
K <sup>+</sup>	0,2-0,6	nd	0-14
<hr/>			
Cond. ( $\mu$ s/cm.)	nd	nd	40-480
TSD	4-12	nd	nd

a) Freeze and Cherry (1979), pp. 239

b) Viñas (1981), datos de 1971 a 1977, en 4 estaciones del municipio de Madrid.

c) López Vera (1982), datos de 1981 y 1982, sobre 14 muestras recogidas en la UAM -pluviómetro abierto-.

Una vez en el subsuelo, el agua tiene la oportunidad de disolver anhídrido carbónico y ácidos húmicos procedentes de la descomposición de la materia orgánica. De este modo, el agua al pasar por los diferentes horizontes del suelo alcanza, aproximadamente, su composición química.

En acuíferos potentes, el tiempo de recorrido de este agua será de 1 m.a., mientras que en general la velocidad del flujo del agua en los acuíferos, es de 1 m/año.

En el agua subterránea natural, la mayoría de las sustancias disueltas se encuentran en estado iónico. Estadísticamente se ha determinado que los constituyentes del agua subterránea, se dividen en:

Iones principales o fundamentales (1-1.000 ppm).

Cationes: Na<sup>+</sup>, Ca<sup>++</sup>, Mg<sup>++</sup>

Aniones: CO<sub>3</sub>H<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>=</sup>, Cl<sup>-</sup>

SiO<sub>2</sub>

. Iones secundarios 1% del total (0,01-10 ppm).

Cationes:  $\text{Fe}^{++}$ ,  $\text{Sr}^{++}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{B}^+$

Aniones:  $\text{CO}_3^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$

. Iones menores (0,0001-0,1 ppm)

Cationes:  $\text{Fe}^{+++}$ ,  $\text{Mn}^{++}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{Al}^{+++}$ , ....

Aniones:  $\text{Br}^-$ ,  $\text{S}^{=}$ ,  $\text{PO}_4^{-3}$ ,  $\text{BO}_3\text{H}_2^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{I}^-$ , ...

. Iones traza (<0,0001)

As, Sb, Cr, Pb, Cu, Zn, Ba, V, Hg, U, etc....

Aunque los iones menores y elementos trazas no suelen determinarse en análisis habituales, tienen mucho interés por ejemplo en prospección geoquímica (detección de filones o yacimientos minerales), para aspectos sanitarios, ya que la legislación contempla en muchos casos unos límites extremos de permisividad y carencia.

#### 4.1.- IONES FUNDAMENTALES

##### Sustancias aniónicas

. Ión Cloruro  $\text{Cl}^-$

Fuentes-Lavado de terrenos de origen marino, aguas de lluvia cerca de la costa, ataque de ciertos minerales asociados a rocas ígneas y metamórficas (sodalita, apatito, etc....), aguas congénitas y fósiles, vertidos urbanos, etc...

Química-Muy estable en disolución, su saturación es muy alta, suele asociarse al ión Na.

<u>Concentración</u> - 10-250 ppm	aguas dulces
18.000-21.000 ppm	" mar
220.000 ppm	salmueras

Nocividad y Toxicidad- >300 ppm - Sabor salado.

Contenidos elevados perjudican las plantas.

Análisis- Se valora con  $\text{NO}_3\text{Ag}$ , con cromato potásico como indicador. Pueden interferir los iones  $\text{Br}^-$ ,  $\text{I}^-$  y  $\text{CN}^-$ .

. Ión Sulfato  $\text{SO}_4^-$

Fuentes- Lavado de terrenos formados en ambiente marino o en condiciones de aridez, oxidación de sulfuros de rocas ígneas, metamórficas o sedimentarias, disolución de yesos y anhidrita.

Química- En medios reductores con abundante materia orgánica, puede sufrir una reducción bacteriana a S o  $\text{S}^{2-}$ , pero en general es estable.

<u>Concentración</u> - 2-150 ppm	aguas dulces
5.000 ppm	" salinas si existe $\text{Ca}^{++}$
200.000 ppm	salmueras si existe $\text{Mg}^{++}$ y $\text{Na}^+$
3.000 ppm	agua del mar

Nocividad y toxicidad- Sabor amargo, si se asocia a Mg y Na tiene propiedades laxantes, en cantidades elevadas es perjudicial para las plantas, con valores de unos cientos de ppm afecta a la resistencia del hormigón y cemento.

Análisis- Varios métodos: Complexométrico, turbidimétrico, gravimétrico.

. Iones Bicarbonatado y Carbonatado  $\text{CO}_3\text{H}^-$  y  $\text{CO}_3^{2-}$

Fuentes- Disolución de  $\text{CO}_2$  atmosférico o del suelo, disolución de calizas y dolomías, ayudada por el  $\text{CO}_2$  y/o ácidos naturales (húmicos, oxidación de sulfuros, etc...), hidrólisis de silicatos, ayudada por el  $\text{CO}_2$ , por ejemplo:  $2\text{Si}_3\text{O}_8 \text{ Al Na} + 11\text{H}_2\text{O} + 2\text{CO}_2 \longrightarrow \text{Si}_2\text{O}_5 \text{ Al}_2(\text{OH})_4 + 2\text{Na}^+ + 2\text{CO}_3\text{H} + 4\text{SiO}_4 \text{ H}_4$ . ALBITA

Química- Existe una profunda relación entre el  $\text{CO}_2$  gas y el  $\text{CO}_2$  - disuelto,  $\text{CO}_3\text{H}^-$ ,  $\text{CO}_3^{=}$  y pH. Si en el acuífero no hay aportes de  $\text{CO}_2$  (reducción de sulfatos, reducción de hierro, etc...) el contenido en carbono disuelto permanece constante ( $\text{CO}_2 + \text{CO}_3\text{H}^- + \text{CO}_3^{=}$ ), y esto se puede considerar así, ya que es el ión dominante en muchas ocasiones, se puede precipitar fácilmente como  $\text{CO}_3\text{Ca}$ .

<u>Concentración</u> - 50-350 ppm	aguas dulces
100 ppm	" mar

(Normalmente el  $\text{CO}_3$  está en concentraciones menores que el  $\text{CO}_3\text{H}^-$ , si el pH 8,5, su concentración puede ser de hasta 50 ppm).

Nocividad y toxicidad- Las aguas bicarbonatadas sódicas son nocivas para el riego por fijar Na en el suelo y crear un medio alcalino. El equilibrio  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}_3\text{H}^-$ ,  $\text{CO}_3^{=}$  y pH determinan la corrosividad o incrustabilidad.

Análisis- En función de la alcalinidad del agua.

. Ión Nitrato  $\text{NO}_3^-$

Fuentes- Ligados a procesos de nitrificación natural (legumbres), en pequeña proporción del agua de lluvia, pero fundamentalmente por descomposición de materia orgánica y contaminación urbana, industrial y ganadera, así como por abonos agrícolas.

Química- Tiende a ser estable, pero puede ser fijada a veces por el terreno o reducirse a  $\text{NH}_4$  y  $\text{N}_2$  en ambientes reductores. La mayoría de los compuestos nitrogenados, pasan a  $\text{NO}_3$  en medio oxidante.

<u>Concentraciones</u> - 0,1-10 ppm	agua dulce
hasta 200 y 1.000 ppm	" polucinada
$\leq 1$ ppm	" mar

Nocividad y toxicidad- Concentraciones elevadas en el agua de bebida puede producir cianosis (metahemoglobina); muchas veces es un indica

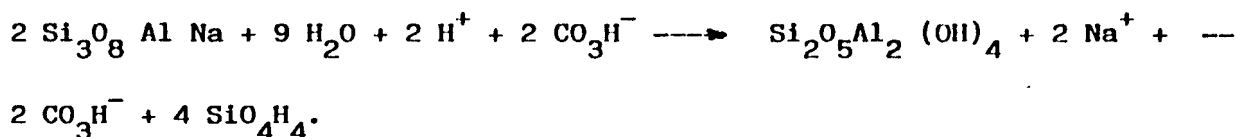
dor de contaminación en cuyo caso suele estar estratificado, dominando las concentraciones mayores en la parte alta del acuífero libre.

Análisis- Colorimetría.

. Sílice SiO<sub>2</sub>

Fuente- Procede de la meteorización de silicatos y otras rocas que contienen sílice soluble, por ejemplo:

Albita



También en pequeñas cantidades de la disolución de cuarzo y formas alotróficas.

Química- La hidroquímica del silicio no está del todo aclarada, pero se cree que la mayoría de la sílice está como SiO<sub>4</sub>H<sub>4</sub>, en parte disuelta y en parte coloidal, sólo una pequeña parte está ionizada (SiO<sub>4</sub>H<sub>3</sub>). El valor del pH es muy importante, precipitándose sílice si este desciende. El CO<sub>2</sub> juega un papel muy importante en su solubilización, al evitar que el pH suba.

Concentración- La mayoría de las aguas naturales, 1-40 ppm.  
100 ppm aguas bicarbonatadas sódicas.

Nocividad y toxicidad- Provoca incrustabilidad en calentadores y calderas.

Análisis- Colorimetría por el método del azul de molibdeno.

Sustancias catiónicas

. Ión Sodio Na<sup>+</sup>

Fuentes- Procede del ataque de feldespatos, feldespatoides y otros

silicatos, lavado de sedimentos de origen marino y cambio de bases con arcillas del mismo origen, mezcla con agua del mar, disolución de materiales salinos (Keuper, etc...), contaminación urbana e industrial, concentración por evaporación.

Química- Alta solubilidad, sin alcanzarse normalmente el producto de solubilidad, se ve muy afectado por el cambio de bases, suele asociarse al  $\text{Cl}^-$ .

<u>Concentración</u> - 1-50 ppm	agua dulce
10.000 ppm	aguas marinas
100.000 ppm	salmueras

Nocividad y toxicidad- Las aguas con concentraciones elevadas en sodio son perjudiciales a las plantas al reducir la permeabilidad del suelo.

Análisis- Fotómetro de llama.

. Ión Potasio  $\text{K}^+$

Fuentes- Procede de la ortosa y otros silicatos (micas, arcillas, etc...), de la disolución de sales evaporíticas potásicas (silvinita, carnalita, ...), lluvia de origen marino, contaminación industrial, minera y agrícola (abonos).

Química- Tiende a ser fijado irreversiblemente por el terreno durante la formación de arcillas (pasando la montmorillonita a illita).

<u>Concentración</u> - 0,1-10 ppm	agua dulce
~ 400 ppm	" mar
100.000 ppm	salmueras

Nocividad y toxicidad- Es vital para las plantas, y no presenta problemas en las concentraciones normales.

Análisis- Fotómetro de llama.

. Ión Calcio  $\text{Ca}^{++}$

Fuentes- De la disolución de calizas, dolomías, yeso y anhidrita, ataque de feldspatos y silicatos cálcicos, disolución de cementos calcáreos de rocas detríticas.

Químicas- Su comportamiento va ligado al de  $\text{CO}_3\text{H}^-$  y  $\text{CO}_3^{--}$  en muchas aguas naturales, pudiéndose precipitar y disolver con facilidad al cambiar el pH, o la presión parcial del  $\text{CO}_2$ .

<u>Concentración</u> - 10-250 ppm	aguas dulces
600 ppm	" selenitosas
~ 400 ppm	" mar

Nocividad y toxicidad- Comunica dureza e incrustabilidad.

Análisis- Valoración Complexométrica.

. Ión Magnesio  $\text{Mg}^{++}$

Fuentes- Disolución de dolomías, ataque de silicatos magnésicos y ferromagnésicos, mezcla con agua del mar, contaminación industrial y minera.

Química- Tiene propiedades similares a las del ión calcio pero más soluble y más difícil de precipitar.

<u>Concentración</u> - 1-100 ppm	agua dulce
1.200 ppm	" mar

Nocividad y toxicidad- Propiedades laxantes, comunica sabor amargo, también contribuye a la dureza del agua y a la incrustabilidad.

Análisis- Complexometría.

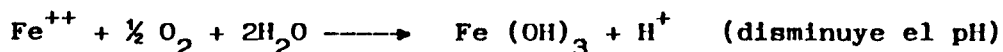


. Iones relacionados con el Hierro  $\text{Fe}^{++}$ ,  $\text{Fe}^{+++}$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})^{++}$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})^+$

Fuentes- Ataque de silicatos férricos, ataque de sulfuros y óxidos de hierro, ataque de la mayoría de las rocas sedimentarias, del entubado de pozos (localmente).

Química- Su estabilidad, depende fundamentalmente del potencial redox, se solubiliza y precipita con facilidad en medios oxidantes se tienen pocas cantidades de hierro disuelto.

La oxidación de  $\text{Fe}^{++}$  se da según:



El  $\text{CO}_3\text{H}^-$  actúa como tampón permitiendo que continúe la reacción y liberándose  $\text{CO}_2$ .

La intervención de ciertos microorganismos promueven la oxidación y reducción del hierro.

Concentración- 0-10 ppm (en aguas aireadas, no suele superar los 0,5 ppm).

100 ppm aguas ácidas.

Nocividad y toxicidad- Produce manchas de herrumbre y depósitos orgánicos fangosos con  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , puede ocasionar incrustaciones duras. Más de 0,5 ppm son nocivas o molestas en general.

Análisis- Colorimetría con bipyridina.

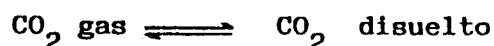
#### 4.2.- PRINCIPALES GASES DISUELTOS

. Anhidrido Carbónico  $\text{CO}_2$

Fuente- Disolución de gases en la zona saturada, descomposición y oxidación de materia orgánica en varios procesos tales como reducción de

sulfatos, hierro, etc... disolución de gases del aire por la lluvia y agua superficial.

Química- Es un gas relativamente soluble que al hidrolizarse produce ácido carbónico parcialmente disociado.



Su papel es importante pues determina el comportamiento químico del agua frente a muchos minerales.

Concentración- 1-30 ppm en contacto con la atmósf.  
hasta 1.500 ppm acuíferos profundos

Nocividad y toxicidad- Las aguas con exceso de  $\text{CO}_2$  son agresivas y pueden ser incrustantes, las que pierden  $\text{CO}_2$ .

Análisis- Por valoración con NaOH con fenolftaleína o conociendo la alcalinidad TAC y pH.

#### . Oxígeno disuelto $\text{O}_2$

Fuentes- Disolución de aire por el agua de lluvia y aguas superficiales, disolución de gases del terreno no saturado, procesos de fotosíntesis en las aguas superficiales.

Química- Juega un papel importante en los procesos redox, produce un medio oxidante, y también en la solubilización o insolubilización de iones que cambian sus valencias, así como en la actividad de microorganismos. Se consume fácilmente si existen sustancias oxidables, como:  $\text{Fe}^{++}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$ , materia orgánica, etc....

Concentración: 10 ppm en contacto con la atmósfera.  
0,5 ppm aguas superficiales.

Nocividad y toxicidad- Puede producir corrosividad, su ausencia - puede producir fermentaciones anaerobias.

Análisis- Método de Winkler o su modificación de Alsterberg.

#### 4.3.- IONES SECUNDARIOS

##### Sustancias aniónicas

##### . Ión Fluoruro $F^-$

Juega un papel muy importante en la conservación de la dentadura, siendo la concentración óptima, 1 ppm (más de 1,5, se considera tóxico).

##### . Ión Bromuro $Br^-$

Su comportamiento es similar al del ión Cl. Su concentración es - inferior a 0,01 ppm.

##### . Iones derivados del Boro B

Se encuentra disuelto como  $BO_3H_3$ , parcialmente disociado  $BO_3H_2^-$ . Su concentración en general es inferior a 0,1 ppm (pero a veces puede llegar a 10 ppm). Es nocivo para las plantas.

##### . Ión Sulfuro y gas Sulfídrico $S^{=}$ y $SH_2$

Fácilmente oxidables a S,  $SO_3^{=}$ ,  $SO_4^{=}$ . Son características de medios reductores, pero no siempre están presentes en los mismos. Su concentración suele ser inferior a 1 ppm (pero pueden llegar a 10 ppm). Es especialmente corrosivo para las aleaciones de Cu.

. Ión Fosfato  $\text{PO}_4^{-3}$

Es poco soluble y suele precipitar como  $(\text{PO}_4)_2\text{Ca}_3$ . La presencia - de Ca limita su contenido y el  $\text{CO}_2$  disuelto lo favorece. Su concentración oscila entre 0,01 y 1 ppm pudiendo llegar a 10 ppm. Es esencial en el ciclo vital de los seres vivientes, y es un factor que interviene en la eutrofización de las aguas.

Sustancias catiónicas

. Ión Manganese  $\text{Mn}^{++}$

Tiene un comportamiento similar al hierro, con los estados de valencia 2, 3 y 4 (con esta última sólo existe como  $\text{MnO}_2$  insoluble). Puede formar complejos orgánicos estables como el hierro. Suele encontrarse por debajo de 0,2 ppm.

. Ión Amonio y Amoníaco disuelto  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{NH}_3$

Son oxidados con facilidad a  $\text{N}_2$ ,  $\text{NO}_2^-$ , o  $\text{NO}_3^-$  y son retenidos fácilmente por el suelo por el cambio de bases. Su contenido normal es inferior a 0,1 ppm, pudiendo llegar a 400 ppm. En concentraciones normales no presenta problemas, pero es un indicio de contaminación.

. Ión Estroncio  $\text{Sr}^{++}$

Es similar al  $\text{Ca}^{++}$ , sus concentraciones en general varían entre 0,01 y 1 ppm (a veces 20 ppm).

. Ión Litio  $\text{Li}^+$

Se caracteriza por su gran solubilidad, siendo poco fijado por el terreno. Sus concentraciones, oscilan entre 0,001 y 0,5 ppm (a veces hasta 1 ppm).

. Iones derivados del Aluminio (alúmina)  $\text{Al}_2\text{O}_3$

El aluminio es muy difícil de poner en solución y queda fuertemente retenido en las arcillas, es fácilmente hidrolizable y anfótero. Juega un papel fundamental en la química de los suelos. En aguas ácidas aparece como  $\text{Al}^{+++}$  y en aguas básicas como  $\text{Al}_2\text{O}_4^-$  o  $\text{Al}_2\text{O}_4\text{H}^-$ . Su concentración va de 0,005-0,3 ppm.

. Ión Uranilo  $\text{UO}_2$

Forma complejos, y en medios reductores pasa a  $\text{U}^{4+}$  y precipita fácilmente, en general es poco frecuente, con concentraciones menores de 0,001 ppm (0,002 en agua del mar). Con altas concentraciones presenta doble toxicidad, radiactiva y químicamente.

## 5.- FENOMENOS MODIFICADORES DEL QUIMISMO DEL AGUA SUBTERRANEA

Cuando las aguas subterráneas, han adquirido su composición química tienden a conservarla a no ser que varíe la composición litológica del acuífero, se produzca alteración química por mezcla con otras aguas, incorporación de sustancias extrañas que varíen la facies química, etc...

### 5.1.- INTERCAMBIO IONICO

El intercambio iónico, afecta principalmente a los cationes y fundamentalmente a los cationes alcalinoterreos y alcalinos (denominados bases en edafología, por lo que también se denomina cambio de bases a este fenómeno). Este proceso va unido a la presencia de fracción arcillosa y materia orgánica ya que poseen una importante capacidad de cambio de bases a tener en cuenta.

Afecta fundamentalmente a los siguientes cationes:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Sr}^{++}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$  (estos dos últimos quedan fijados irreversiblemente). Sin embargo no afecta a todos los cationes con igual intensidad, ya que afecta más al  $\text{K}^+$  que al  $\text{Na}^+$ .

Un agua con una relación entre dos cationes cualesquiera X e Y que valga  $(\text{rX/rY})_a$  alcanza el equilibrio con un terreno cuyas sales absorbidas tengan una relación determinada  $(\text{rX/rY})_t$ . Si en el agua crece esa relación, el terreno se opone a la modificación cediendo iones Y y tomando iones X.

Estos cambios de bases, se ponen de manifiesto mediante el ICB (índice de cambio de desequilibrio entre cloruros y alcalinos).

$$\text{ICB} = \frac{\text{rCl}^- - \text{r} (\text{Na}^+ + \text{K}^+)}{\text{rCl}^-}$$

En un agua subterránea este valor suele tomar un valor positivo o negativo, en general próximo a 0. Si existe ablandamiento (cambio de  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{Mg}^{++}$  por  $\text{Na}^+$ ) su valor tiende a disminuir.

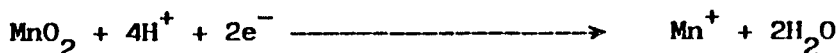
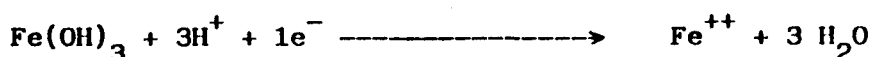
Si el ICB es negativo se utiliza otra expresión:

$$\text{ICB} = \frac{r\text{Cl}^- - r(\text{Na}^+ + \text{K}^+)}{r(\text{SO}_4^{--} + \text{CO}_3\text{H}^- + \text{NO}_3^-)} \quad \text{(Pero habrá que asegurarse que no exista reducción de sulfatos ni precipitación de calcita).}$$

## 5.2.- FENOMENOS DE OXIDACION -REDUCCION O REDOX-

Los fenómenos de oxidación -reducción o redox-, pueden modificar la composición del agua ya sea poniendo en solución o precipitando ciertos iones que pueden presentarse en varios estados de valencia:  $\text{Fe}^{++}$ ,  $\text{Mn}^+$ ,  $\text{NO}_3^-$  - (que puede ser reducido a  $\text{N}_2$  o  $\text{NH}_4^+$ , y estos ser oxidados a  $\text{NO}_2^-$  y  $\text{NO}_3^-$ ),  $\text{UO}_2^{++}$  (en medios reductores pasa a  $\text{U}^{4+}$ , que es insoluble y precipita en el terreno).

Las reacciones redox, consumen y producen hidrogeniones y alteran el pH, estando regidas por la presión, temperatura, etc...



El efecto tampón del equilibrio  $\text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{CO}_3\text{H} \rightleftharpoons \text{CO}_3$  es muy importante. Las oxidaciones ceden hidrogeniones y aumenta la agresividad del agua, permitiendo nuevas disoluciones de caliza, mientras que las reducciones consumen hidrogeniones pudiendo precipitar calcita.

El potencial redox (Eh) de estos sistemas, mide la estabilidad de un ión en un nivel de oxidación determinado:

$$E_h = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{\langle \text{OX} \rangle}{\langle \text{Red} \rangle}$$

$\langle \text{OX} \rangle$  = actividad molar del ión oxidado.

$\langle \text{Red} \rangle$  = actividad molar del ión reducido.

$E_h$  = potencial redox en voltios.

$E_0$  = potencial en voltios del electrodo cuando  $\text{OX} = \text{Red}$

$R$  = constante de los gases = 8,32 julios/°K mol.

$n$  = cambio de valencia en la reacción (eq - g/mol).

$F$  = número de Faraday = 96.500 culombios/eq - g.

### 5.3.- CONCENTRACIONES Y PRECIPITACIONES

Con el aumento del tiempo de contacto del agua con el terreno, se pueden ir disolviendo más sales hasta alcanzarse los respectivos productos de solubilidad. El aumento de concentración permite disolver nuevas cantidades de sales que estaban en saturación por el aumento de fuerza iónica.

La concentración por evaporación, es un fenómeno que rara vez ocurre salvo en acuíferos superficiales, en que actúa la evapotranspiración o en acuíferos profundos con aportes de gases calientes procedentes de emanaciones volcánicas o fugas de vapor. También se pueden producir concentraciones por ósmosis (ultrafiltraciones) en acuíferos semiconfinados a gran presión, (este fenómeno aún no se conoce muy bien).

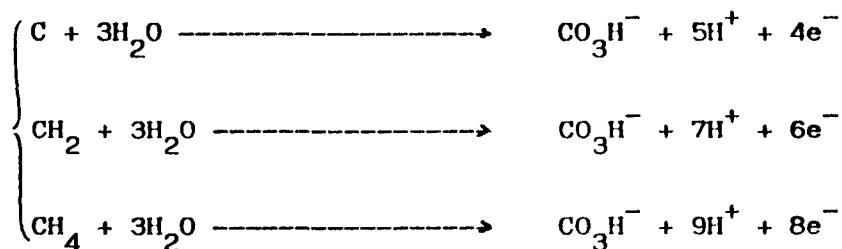
Otras veces se pueden producir precipitaciones por mezclas de aguas de distintas composiciones, etc...

### 5.4.- REDUCCION DE SULFATOS Y DE HIERRO

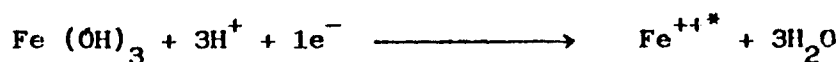
Este fenómeno se produce en ambiente reductor con abundante materia orgánica. Y en el caso de reducción de sulfatos, consiste en el paso de ión sulfato  $\text{SO}_4^{=}$  a  $\text{S}^{=}$ ,  $\text{S}$  o  $\text{S}_2\text{O}_3^{=}$ , produciéndose por medio de ciertas bacterias en ambiente anaerobio, que actúan como catalizador. Son poco conocidas biológicamente: Desulfovibrio (5 especies) y Desulfotomaculum (3 especies).



Utilizan el carbono orgánico y lo queman con el oxígeno que toman del sulfato, existiendo una producción de  $\text{CO}_2$  que se incorpora al agua.



Si además se tiene solubilización de hierro:



- Si existe producción de  $\text{H}^+$   $\longrightarrow$  el agua se alcaliniza y -  
puede precipitar  $\text{CO}_3\text{Ca}$ , y el  $\text{S}^{=2}$  queda fijado como  $\text{SFe}$  o  $\text{S}_2\text{Fe}$ .

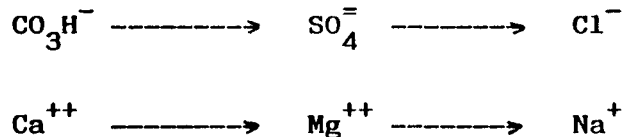
- Si se consumen  $\text{H}^+$ ,  $\text{CO}_3\text{Ca}$  se disuelve y  $\text{S}^{=2}$  queda como  $\text{SH}_2$ .

Se puede desprender  $\text{CO}_2$  si se produce el proceso a poca profundidad.

## 6.- EVOLUCION GEOQUIMICA DEL AGUA EN LOS ACUIFEROS-TECNICAS DE ESTUDIO

En general las aguas de circulación regional, tienden a ir aumentando su mineralización hasta saturarse en diferentes iones. Por estos procesos el agua puede tener una composición muy diferente de la roca por la que circula, tanto más, cuanto más se aleja del lugar de infiltración.

Así pues, la evolución normal de un agua de circulación regional es que sucesivamente vayan dominando los siguientes iones:



Sin embargo, las condiciones de partida condicionan el desarrollo de la evolución, ya que por ejemplo, si el medio es fuertemente reductor se puede tener una reducción bacteriana del  $\text{SO}_4^{--}$ , mucho más rápida que su disolución, en cuyo caso este ión no rebasará unos pocos ppm. Esta ley también admite la excepción de que por ejemplo, el agua infiltrada no tenga como iones dominantes al  $\text{Ca}^{++}$  y al  $\text{CO}_3\text{H}^-$ , y así la secuencia comenzaría en diferentes puntos.

Al aumentar la concentración de sales, aumenta la fuerza iónica y por lo tanto las solubilidades se van incrementando ligeramente, así los iones que antes saturaban antes, ahora aumentarán sus concentraciones.

Según Schoeller, un agua con un total de sólidos disueltos de 60 meq/l, se observa siempre que el anión menos abundante es el  $\text{CO}_3\text{H}^-$  y por encima de 360 meq/l se tiene siempre que:



- Relación  $rSO_4/rCl^-$

En aguas algo salinas, el ión  $SO_4^{=}$  tiende a hacerse constante y entonces tiene interés similar al de la relación  $rCl/rCO_3H$ , no siendo útil si se produce reducción de sulfatos.

- Indices de desequilibrio entre cloruros y alcalinos o indice de cambio de bases

$$IDD, ICB = \frac{rCl^- - r(Na^+ + K^+)}{rCl^-} \quad ICB (-) = \frac{rCl^- - r(Na^+ + K^+)}{r(SO_4^{=} + CO_3H^- + NO_3^-)}$$

## 7.- TOMA DE MUESTRAS DE AGUA

La operación de toma de muestras de cualquier sustancia con el fin de hacer un análisis de ella, es muy delicada y compleja, ya que la validez de los resultados que se obtengan en las operaciones a que se someta posteriormente, dependerá en gran parte de la perfección del muestreo realizado.

En el caso de toma de muestras de agua, se trata de una operación que presenta diferentes facetas, según el destino que se quiera dar a la misma, o el tipo de análisis a realizar (gases, sustancias contaminantes químicas o bacteriológicas, etc...). Así como también será distinta si se trata de aguas superficiales: ríos, embalses,...; o de aguas subterráneas, efluentes de poblaciones, etc...

- Un factor importante, es la elección de recipientes adecuados para la toma de muestras, en cuanto a volumen, calidad y características, que dependerán del tipo de análisis a realizar.
- En el momento de la toma de muestras, además de la situación de muestreo, fecha, etc..., han de anotarse otra serie de datos que varían de un día a otro y que pueden ser útiles a la hora de interpretar los resultados: hora de la toma, forma en que la toma se realizó, profundidad a que se ha tomado la muestra, características geológicas, si se trata de un pozo o un sondeo, profundidad del nivel piezométrico, características de construcción,... Por otro lado existen una serie de parámetros y características fisicoquímicas, que son necesarias medir "in situ", si se quiere obtener datos representativos: T<sup>a</sup> del agua y del aire, conductividad, pH, Oxígeno disuelto, nitritos y nitratos, color, transparencia, etc...

- Ha de procurarse que el tiempo que transcurra entre la toma de muestras y el análisis sea el menos posible, ya que la muestra puede alterar su composición en ese espacio de tiempo, bien porque el sistema físico-químico inicial sea inestable por sí, o por el cambio de presión, temperatura, influencia de microorganismos susceptibles de desarrollarse que se encuentran presentes en el agua, etc...
- Un programa de muestreo y análisis, debe adaptarse al fin que se persiga (Ej: estudio de un acuífero, control de variaciones temporales de composición, definición de ciertas características locales de un agua determinada, etc...). Por esta razón habrá de proyectarse de tal forma, que con los medios que tengamos a nuestro alcance, seamos capaces de realizar la descripción, lo más cerca posible de la realidad, del fenómeno a estudiar. Por lo que si está correctamente proyectado seguirá las siguientes pautas:
  - . Estudios preliminares-recopilación bibliográfica, etc.
  - . Determinación del nº de muestras a tomar y parámetros a manejar.
  - . Frecuencia de los muestreos y volumen de muestras a tomar.
  - . Elección de estaciones de muestreo.
  - . Técnicas analíticas adecuadas.
  - . Representación e interpretación de los análisis obtenidos.
- Ante todo, se debe tener presente que no será posible realizar un muestreo perfecto, debiendo prevenir el error con que se va a conocer el dato que se quiere determinar, así como la aproximación que necesitamos.

## 8.- REPRESENTACION DE LAS CARACTERISTICAS HIDROQUIMICAS

### 8.1.- BALANCE DE ANIONES Y CATIONES EN ANALISIS QUIMICOS-ERRORES

Los análisis químicos, presentan formas y contenidos muy diversos según el uso que se les vaya a dar. Ahora bien si se desea conocer las propiedades químicas más importantes de un agua, se procederá a determinar los iones fundamentales y algunas otras características:  $\text{CO}_3\text{H}^-$ ,  $\text{CO}_3^{=}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{=}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ , conductividad, Tª, pH, DBO, DQO, Total de sólidos disueltos, etc...

En un análisis químico completo, correspondiendo a una solución electrolítica, es condición necesaria, que exista electronegatividad, para lo cual es necesario que se cumpla la siguiente igualdad:

$$r(\text{CO}_3\text{H}^- + \text{SO}_4^{=} + \text{NO}_3^-) = r(\text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++})$$

En la práctica existirá diferencia, entre ambas cifras, debida a errores acumulados en cada una de las determinaciones individuales (y al no tener en cuenta las contribuciones iónicas menores).

Si Cat. y An., representan respectivamente las sumas de los mili equivalentes de cationes y aniones, el % de error del balance del análisis vendrá dado, según distintos autores, por:

$$\text{Error \%} = 200 \frac{\sum \text{cat} - \sum \text{an}}{\sum \text{cat} + \sum \text{an}} \quad (\text{Cust., 1976})$$

Error (%)	30	10	8	4	4
Admitido					
Conduc. (µs/cm)	50	200	500	2.000	2.000

$$\text{Error \%} = 100 \frac{\sum \text{cat} - \sum \text{an}}{\sum \text{cat} + \sum \text{an}} \quad (\text{Freeze and Cherry, 1979})$$

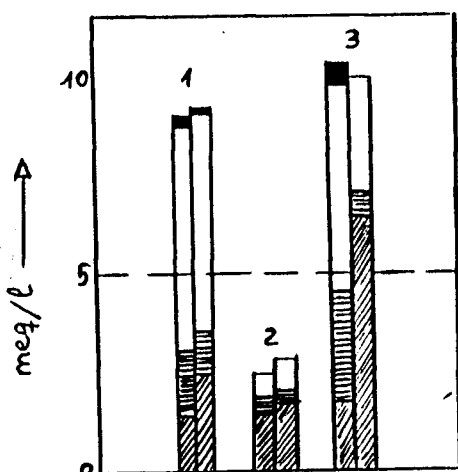
Error admitido (%) < 5

## 8.2.- REPRESENTACIONES GRAFICAS DE LAS CARACTERISTICAS QUIMICAS DE UN ANALISIS DE AGUA Y SU UTILIDAD

El manejo y estudio de un análisis químico se puede simplificar con el empleo de gráficos y diagramas, sobre todo cuando se tratan de comparar análisis de agua de un lugar en momentos de tiempo diferentes o de diferentes lugares. Estas representaciones gráficas ponen de manifiesto variaciones temporales, espaciales o resaltan relaciones entre los iones de una misma muestra, por otro lado existen los hidrogramas químicos y los planos o mapas hidroquímicos.

### . Diagramas Columnares, diagramas de Collins (meq/l)

Desde una base común en dos columnas adosadas se disponen apilados por un lado, los cationes y por otro los aniones, en el orden:  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{CO}_3\text{H}^- + \text{CO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ .



Las dos columnas resultantes deberán ser aproximadamente de la misma altura. Se pueden adaptar a mapas hidroquímicos.

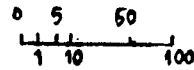
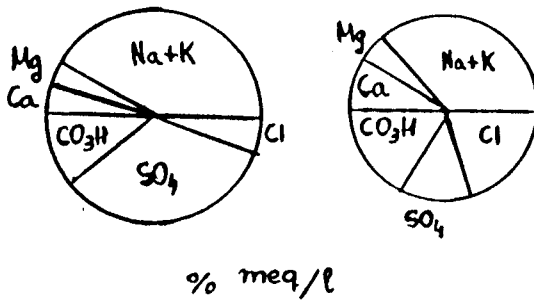
#### CLAVE:

$\text{K}^+$		$\text{NO}_3^-$
$\text{Na}^+$		$\text{Cl}^-$
$\text{Mg}^{++}$		$\text{SO}_4^-$
$\text{Ca}^{++}$		$\text{CO}_3\text{H}^-$



### . Diagramas circulares

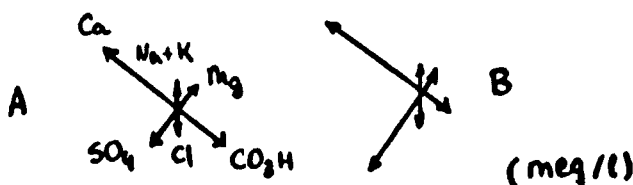
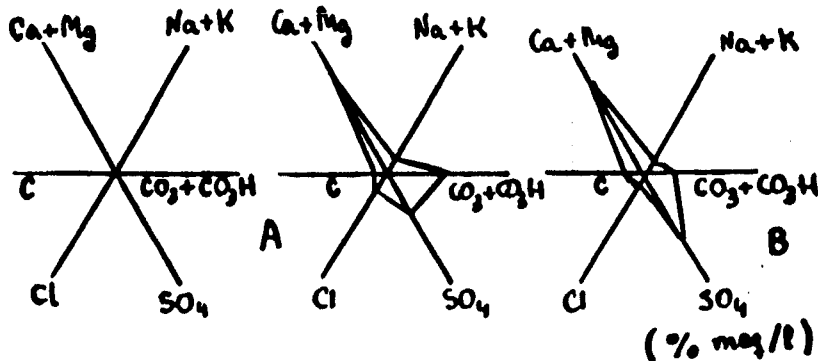
Se dibuja un círculo de radio proporcional al Residuo Seco, Total de Sólidos Disueltos o Conductividad. Y el círculo se divide en sectores proporcionales a los % de los distintos componentes, dejando un semicírculo para cationes y otro para aniones. Se adaptan a mapas geohidroquímicos pero son difíciles de leer.



Escala de radios  
(TOTAL MEQ/L)

### . Diagramas en estrella-radiantes

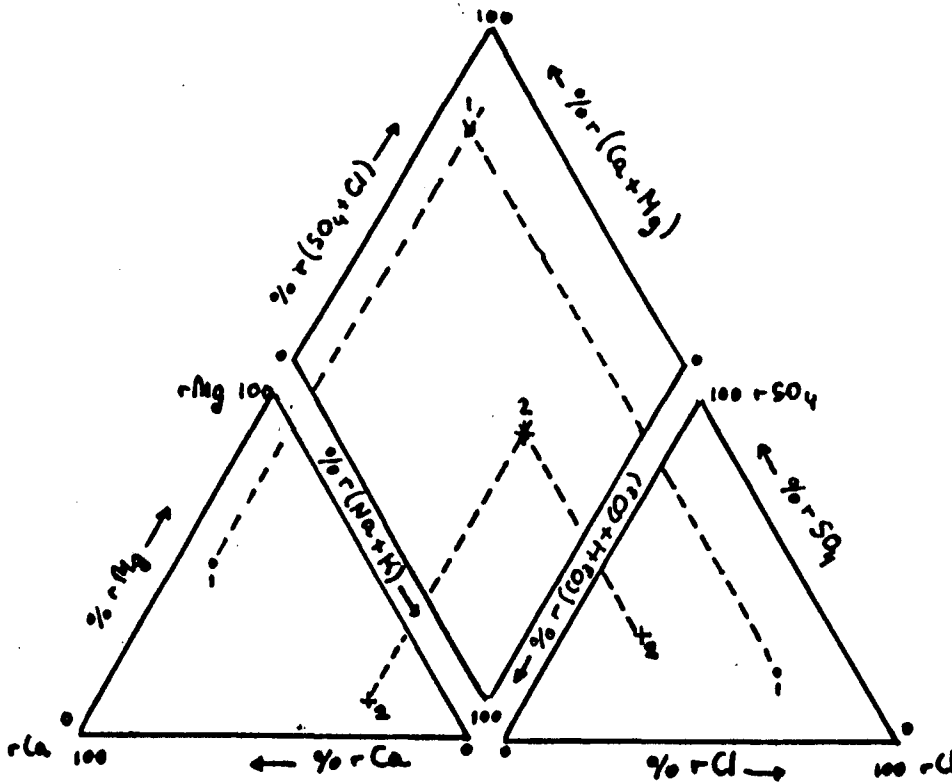
Sobre 4, 6, 12 semirectas convergentes, se toman segmentos proporcionales a meq/l o % de cada ión, y se unen por los extremos formando un polígono. Se pueden tomar en cada semirecta 1 solo ión, o 1 catión y 1 anión simultáneamente.



### . Diagramas triangulares de Piper-Hill-Langelier

Esta representación consta de dos triángulos, uno para cationes y otro para aniones con sus bases alineadas, cada vértice representa el

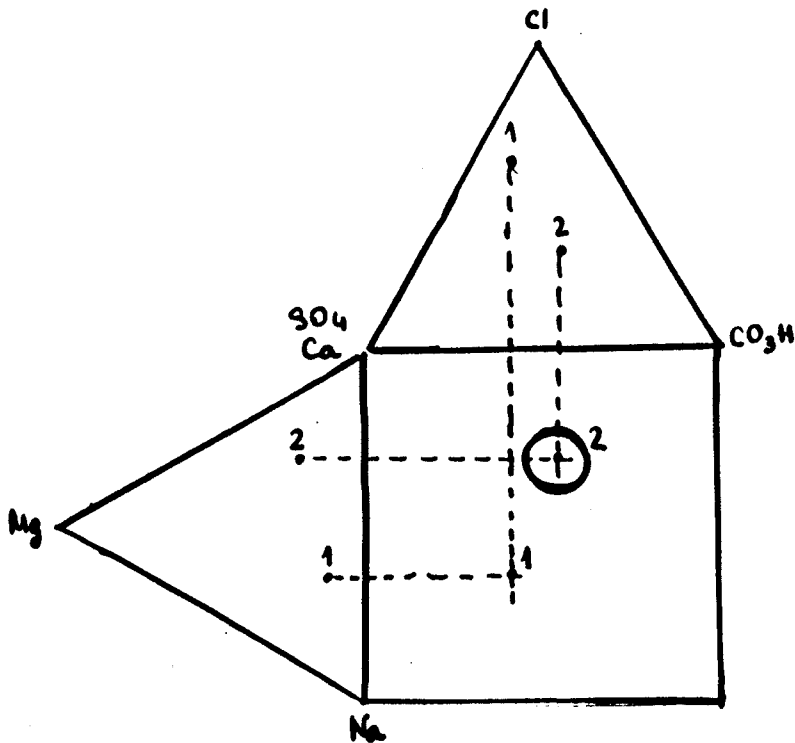
100% de un ión particular o grupo de iones. La composición con respecto a los cationes, por ejemplo se indica por medio de un punto en el triángulo de los cationes, basándose en los porcentajes de los tres grupos que se consideran. La parte central del diagrama tiene forma de rombo, sobre el cual se proyectan después los puntos de cada uno de los triángulos por medio de una recta paralela al borde superior de la figura. La



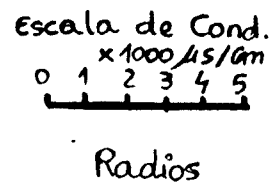
intersección de estas dos rectas representa la composición del agua con respecto a una determinada agrupación de aniones y cationes.

### . Diagramas triangulares de Durov

En este caso también se utilizan dos diagramas triangulares separados para representar aniones y cationes en % meq/l. Cada análisis quedará representado en un campo central cuadrado, en función de los porcentajes de aniones y cationes. Los valores están representados por círculos cuyos radios tendrán una escala lineal, pero si conviene podría tomarse logarítmica, para evitar tener círculos demasiado grandes o pequeños.



También pueden acompañarse estos diagramas, con la representación conjunta de los sólidos disueltos.



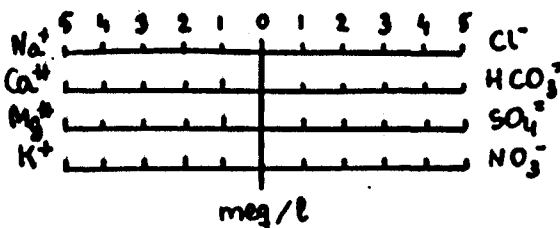
### . Diagramas de Stiff modificados

Es un tipo de diagrama poligonal, en el que se tienen cuatro rectas paralelas equidistantes, cortadas por una normal dando dos campos:

izquierdo - cationes

derecho - aniones

Sobre cada semirecta se toma un segmento proporcional a los meq/l del ión correspondiente y se unen los extremos dando un polígono correspondiente.



En aguas subterráneas se pueden utilizar las siguientes disposiciones de rectas bases:

Na + K, Mg, Ca ;

Cl + NO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>, CO<sub>3</sub>H + CO<sub>3</sub>



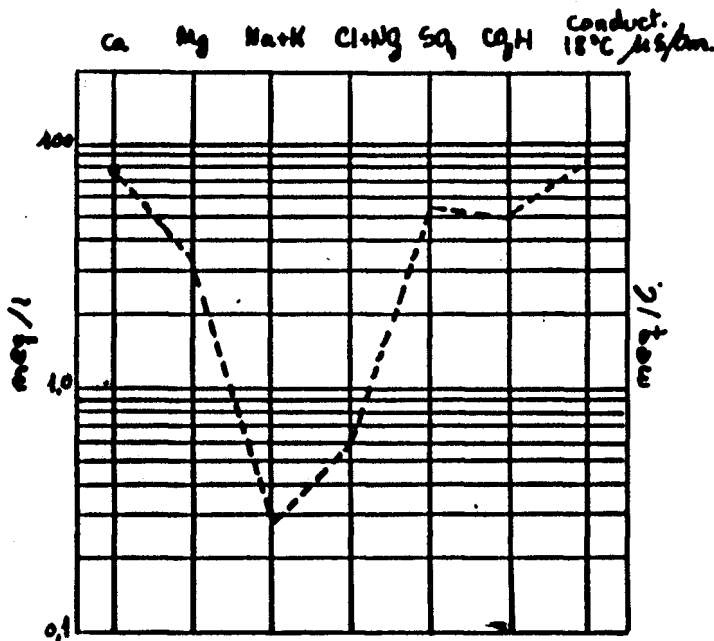
K, Na, Mg, Ca;

$\text{NO}_3$ , Cl,  $\text{SO}_4$ ,  $\text{CO}_3\text{H} + \text{CO}_3$

Son muy útiles en mapas.

. Diagramas logarítmicos de Schoeller-Berkaloff

La representación se realiza en columnas de escala logarítmica del mismo módulo, utilizándose concentraciones absolutas en meq/l, todas las columnas tienen las potencias de 10 en la misma horizontal, pero para facilitar la representación se aísla una columna con esa graduación y las otras se expresan en ppm.



La ordenación normal de las columnas de iones es de izquierda a derecha:  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{--}$ ,  $\text{CO}_3\text{H}^-$  dejando 1 ó 2 columnas al final para representar alguna característica que interese. La inclinación de la recta que une los puntos representativos de dos valores, mide su relación.

Otras formas de representación: mapas de isolíneas, en que se pueden representar cualquier ión o característica.

## 9.- NORMAS DE POTABILIDAD. CRITERIOS DE CALIDAD PARA USO HUMANO, AGRICOLA E INDUSTRIAL

La calidad de un agua, queda definida por su composición, y el conocimiento de los efectos que puede causar cada uno de los elementos que contiene o el conjunto de todos ellos, permite establecer las posibilidades de su utilización clasificando así de acuerdo con límites estudiados, su destino para bebida, usos agrícolas, industriales, etc...

### 9.1.- CONCEPTO DE POTABILIDAD

Se denomina potable a aquella agua, que puede ser consumida por el hombre sin peligro alguno para su salud. Ello supone tener en cuenta las distintas características del agua ya sean físicas, químicas, bacteriológicas, etc... definiendo criterios de calidad para cada una de ellas.

La tendencia mundial es la normalización de las reglamentaciones existentes, no sólo en cuanto a fijar los límites admisibles de las características del agua, sino también en lo referente a toma de muestras, frecuencia de las mismas y métodos de análisis a utilizar.

Los criterios usuales para dictaminar acerca de la potabilidad de un agua son el químico y bacteriológico.

Potabilidad química.- Cuando las concentraciones de sus elementos satisfagan las condiciones fijadas para ello.

Potabilidad bacteriológica.- Cuando estando el agua exenta de bacterias patógenas, los resultados de los diversos análisis de este tipo a que se someta sean satisfactorios.

## 9.2.- CODIGO ALIMENTARIO ESPAÑOL

Se trata de la normativa oficial que define la aceptabilidad del agua para bebida. Al igual que en todos los países desarrollados, se han definido unos límites máximos admisibles para los parámetros que definen la calidad del agua, así como unos límites que se consideran como más convenientes.

El código considera "agua natural" a la de este origen destinada a la bebida y preparación o manipulación de alimentos que reuna como mínimo, las condiciones físicas, químicas y bacteriológicas consideradas como "tolerables".

Atendiendo a las mencionadas características, el Código distingue las siguientes clases de agua:

a) Potable: Será aquella cuyas condiciones físico-químicas y microbiológicas no sobrepasan los límites establecidos como máximos o "tolerables".

b) Sanitariamente tolerable:

1.- Aquella en que algunos de sus caracteres físicos y químicos sobrepasan los límites máximos o tolerables "Siempre - que no sean productos tóxicos o radiactivos, ni los que den agresividad al agua, ni tampoco los que indiquen una posible contaminación fecal".

2.- Aquella que, siendo física o químicamente potable "Contiene coliformes o estreptococos fecales, o clostridios sulfito-reductores en las siembras efectuadas con un volumen de 10 ml del agua problema "pero en ausencia del Echerichia - coli, debidamente comprobado".

c) No potable: Sus características impiden su inclusión en alguna de sus clases anteriores.

### 9.3.- CALIDAD PARA USOS AGRICOLAS, GANADEROS E INDUSTRIALES

- . Existen muchas clasificaciones establecidas para el agua destinada a riego, siendo en general de las más utilizadas las que definen el índice SAR (Clasificación de la U.S. Salinity Laboratory Staff). Esta clasificación se basa en la concentración total de sales solubles expresadas por la conductividad eléctrica en  $\mu\text{s}/\text{cm}$  a  $25^{\circ}\text{C}$  y la concentración relativa del sodio respecto al calcio y magnesio:

$$\text{SAR} = \frac{\text{rNa}}{\sqrt{\frac{\text{rCa} + \text{rMg}}{2}}}$$

- . El agua destinada a la bebida de los animales debe cumplir unas características bacteriológicas de potabilidad similares a las de consumo humano.
- . La diversidad de usos que el agua tiene en la industria supone asimismo unas necesidades muy diferentes de calidad para cada uno de ellos. Pero de forma general se puede establecer:

Usos generales - calderas, refrigeración, etc...

Usos para procesos - tintes, papel, metalúrgico,...

BIBLIOGRAFIA

- CATALAN, J. (1980).- "Química del Agua". Ed. Blume 355 pp. Madrid.
- CUSTODIO, E. y LLAMAS, M.R. (1976).- "Hidrología Subterránea", Vol. I y II. Editorial Omega.
- FREEZE and CHERRY (1979).- "Groundwater". Englewood Cliffs, N.J. Prentice Hall, 504 pp.
- VIÑAS ARREBOLA, M.C. (1981).- "Evolución de algunas impurezas en la precipitación". Tesis de licenciatura 83 pp. Facultad de CC. Físicas. Univ. Complutense de Madrid.



H I D R O M E T R I A

Fernando J. Terán

## H I D R O M E T R I A

### 1. INTRODUCCION.

### 2. AFOROS.

2.1. Aforo con flotador.

2.2. Aforo volumétrico

2.3. Aforo con vertederos.

2.4. Aforo químico.

2.5. Aforo con molinete. .

2.5.1. Elección de la sección y secciones parciales.

2.5.2. Medida de la velocidad.

2.5.3. Medida de la sección.

2.6. Cálculo del caudal.

2.7. Molinetes.

### 3. ESTACIONES DE AFORO

3.1. Introducción.

3.2. Sección limnimétrica.

3.3. Sección de aforos.

3.4. Control.

3.5. Clasificación de las estaciones.

### 4. CURVA DE CAUDALES. CALCULO DE CAUDALES MEDIOS.

4.1. Ecuación y forma de la curva de caudales o gastos.

4.2. Errores en los aforos.

4.3. Determinación de los caudales medios diarios.

## 1. INTRODUCCION.

El término HIDROMETRIA, formado a partir de las palabras griegas HIDRO (agua) y METRIA (medida), designa la ciencia que estudia la medida del agua en su sentido más amplio; sin embargo, para la Hidrogeología lo más interesante es la medida de las aguas superficiales.

En un estudio hidrogeológico el objetivo de la Hidrometría es conseguir los datos de base, es decir, los caudales medios diarios de cursos de agua superficiales en aquellos puntos considerados de interés para la investigación hidrogeológica.

Para ello es necesario crear una infraestructura hidrométrica implantada con criterios hidrogeológicos capaz de aportar las informaciones necesarias para el cálculo de los recursos en aguas subterráneas.

Conseguidas estas informaciones sobre los caudales de las aguas superficiales, veamos cuáles son algunos de los objetivos perseguidos por el hidrogeólogo en su tratamiento.

- a) Contribuir a definir las condiciones en los límites de los sistemas o cuencas hidrogeológicas.
- b) Calcular la aportación de los acuíferos de una cuenca al caudal del río mediante la descomposición del hidrograma en "escorrentía subterránea" y en "escorrentía superficial".
- c) La interpretación de la última parte de la curva de descenso o curva de agotamiento permite, mediante la determinación del coeficiente de agotamiento, el cálculo de las reservas por encima del nivel de la fuente.
- d) El cálculo de los caudales medios específicos de una cuenca permite las extrapolaciones a otras cuencas no aforadas de características hidrológicas y geológicas similares.
- e) La posibilidad de correlacionar los caudales con los niveles piezométricos permite, en principio, hacer previsiones del caudal de estiaje a corto plazo.
- f) Disponer de una serie pluviannual bastante larga de los caudales de estiaje permite calcular las frecuencias de los diferentes caudales, y basar sobre el caudal de estiaje más probable la

posibilidad de reforzar estos estiajes con explotación sobre las reservas. Este es el caso corriente de regulación de manantiales mediante captaciones próximas.

## 2. AFOROS.

El caudal es el volumen de agua que pasa en la unidad de tiempo a través de una sección transversal a la corriente. A la medida de caudales en los ríos se le denomina aforos.

Entre los procedimientos frecuentemente utilizados para aforar los ríos y en general los cursos de agua superficial se pueden distinguir los siguientes:

- flotador
- volumétrico
- vertederos
- químicos (por dilución)
- molinetes

### 2.1. Aforo con flotador.

Se basa en la determinación de la velocidad mediante la medición del tiempo que tarda un flotador en recorrer una distancia conocida.

El flotador puede ser:

- de superficie (botella lastrada).
- de inmersión (que está constituido por un cesto lastrado unido a un pequeño flotador mediante una cuerda de longitud 0,6 d).
- de bastón lastrado (es un tubo lastrado penetrando en el agua el 90% de la profundidad).

Estos tres tipos se pueden apreciar en la Figura 1.

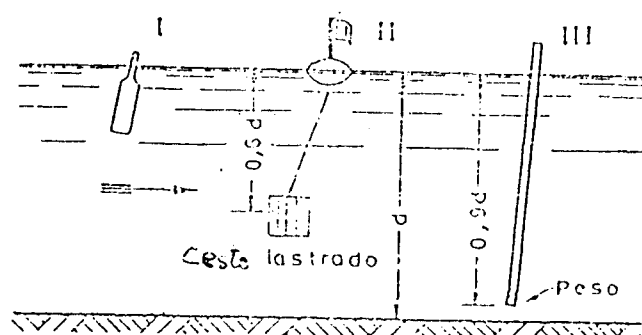


Figura I

La velocidad media de la corriente se obtiene por la fórmula siguiente:

$$V_m = K \frac{L}{t_m}$$

siendo L la distancia a recorrer por el flotador que conviene que sea lo más grande posible (a partir de 10 m);  $t_m$  el tiempo medio que ha tardado en recorrer dicha distancia. El tiempo medio se obtiene como media aritmética de 10 tiempos que se toman de otros tantos experimentos, procurando situar al flotador en cada experimento a distintas distancias de la orilla. K es una constante que varía de 0,75 a 0,85 según la dirección del viento, influyendo mucho más en el flotador de superficie que en los otros dos.

Una vez obtenida la velocidad media se calcula la sección media haciendo 10 medidas de anchura y profundidad para obtener las correspondientes anchuras y profundidades medias.

De este modo el caudal se expresa como

$$Q = V_m \cdot A_m = V_m \cdot a_m \cdot y_m$$

En la práctica, en vez de flotadores reglamentados se usan pequeños trozos de ramas. Con este método no se obtiene un valor preciso del caudal, pero en determinados casos, como es la realización del reconocimiento de los ríos, puede valer.

## 2.2. Aforo volumétrico.

Consiste en medir el tiempo que tarda en llenarse un depósito de capacidad conocida. Con lo cual dividiendo el volumen de agua del depósito por el tiempo se obtiene el caudal.

Para evitar errores en la medida del tiempo debe conseguirse que el tiempo de llenado sea como mínimo 20 segundos.

Como tampoco se usan recipientes muy grandes, sólo es posible la medida de pequeños caudales.

Tampoco es un método que dé valores muy precisos.

## 2.3. Aforo con vertederos.

El vertedero es un dique o pared que intercepta la corriente, causando una elevación del nivel aguas arriba y se emplea para medir caudales o para control de nivel.

De los diversos tipos de vertederos los más utilizados en la medición de caudales son los de pared delgada. El vertedero se forma con una chapa de unos 5 mm de espesor de acero inoxidable en la que se practican diversas aberturas (rectangulares, trapezoidales, triangulares, parabólicas, etc.) tal como se aprecia en la Figura II.

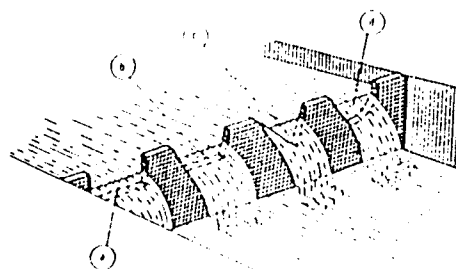


Figura II

En los vertederos el caudal es función de la variable  $h$ , lo que simplifica la medida. Esta variable  $h$  se ha de tomar a una distancia no menor de  $1a$ , donde " $a$ " es el espesor de la lámina en el vertedero, tal como se aprecia en la Figura III.

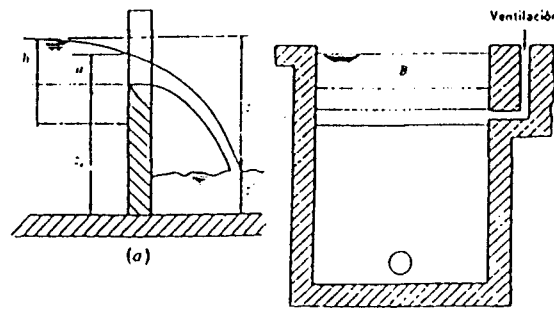


Figura III

Tal como se aprecia en la Figura III, el vertedero debe estar ventilado con objeto de introducir aire debajo de la lámina de agua, porque si no el agua arrastraría el aire que se encuentra debajo de la lámina aguas abajo del vertedero y se crearía succión, engañándonos el caudal. Procediendo de este modo, el caudal para vertedero rectangular será

$$Q = C_d \frac{2}{3} b h \sqrt{2gh}$$

donde  $C_d$  es un coeficiente adimensional, que suele oscilar entre 0,64 y 0,79.

#### 2.4. Aforo químico.

El método consiste en inyectar en el río un caudal constante conocido, de una solución de sal con una concentración  $C_1$ , durante un tiempo suficientemente largo para obtener en la sección de muestreo  $s$ , situada suficientemente lejos aguas abajo, una concentración homogénea  $C_2$  durante un cierto intervalo de tiempo.

Si suponemos que:

- a) el río tiene régimen permanente durante la medida,
- b) la concentración  $C_2$  es la misma en toda la sección de muestreo durante la duración del escalón.
- c) la cantidad de sal por la unidad de tiempo en la sección de inyección y de muestreo es la misma durante el escalón de concentración mientras se mantenga la inyección a caudal constante.
- d) el agua del río, antes de la inyección, lleva una concentración  $C_0$  de la sal que vamos a inyectar.

podemos escribir, puesto que la cantidad de sal se conservará en

ambas secciones, que

$$QC_0 + qC_2 = (Q + q)C_2$$

Si suponemos  $C_0 = 0$  y  $q$  despreciable frente a  $Q$  en  $(Q + q)C_2$ , tendremos

$$Q = q \frac{C_1}{C_2}$$

siendo  $q$  el caudal de inyección, que se conoce mediante el calibrado del diafragma que colocamos en el vaso inyector y  $C_1$  y  $C_2$  las concentraciones de la solución concentrada y de las muestras respectivamente, que se determinan por un método calorimétrico.

La solución concentrada de sal se diluye progresivamente en el río hasta llegar a la sección de muestreo en un tiempo característico de la naturaleza del río y de su caudal; las primeras partículas de la sal llegan en un tiempo  $t_1$  a la sección de muestreo y a partir de un tiempo  $t_2$  tiene lugar la aparición de un escalón a caudal constante hasta un tiempo  $t_4$ .

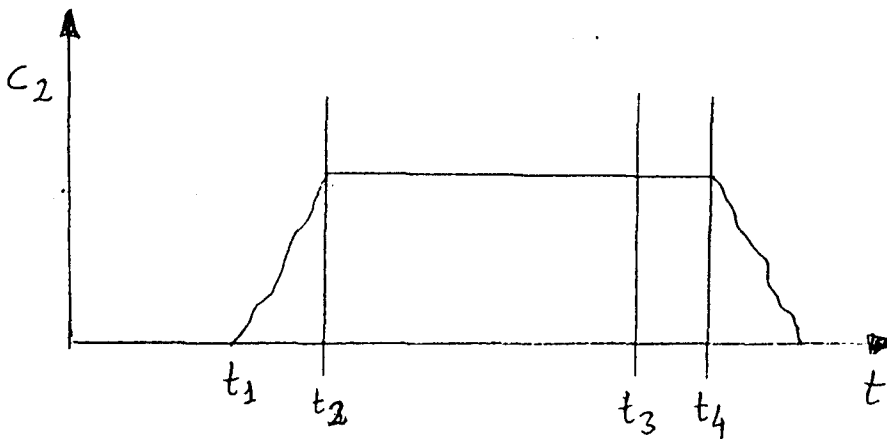


Figura IV

Las curvas de aparición y desaparición no interesan en este método, lo que se busca es el escalón donde la concentración  $C_2$  se mantiene constante.

## 2.5. Aforo con molinete.

El método consiste en dividir la sección transversal del río en secciones parciales y calcular sus respectivos caudales mediante el producto, bien sea aritmético o gráfico, de la velocidad por el área correspondiente. El caudal total se obtendrá mediante la



suma de los caudales.

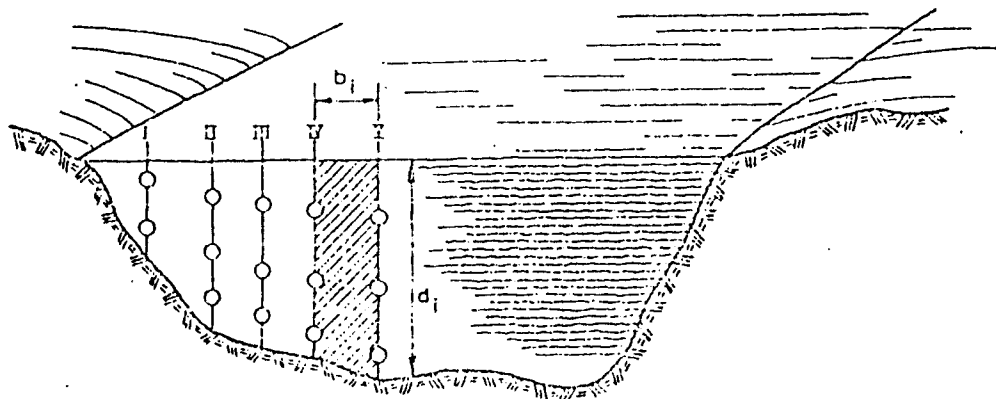


Figura V

#### 2.5.1. Elección de la sección y secciones parciales.

Una vez visto el principio del método, veamos como se elige el lugar de aforo.

En una estación hidrométrica o de aforos la sección de medida es perfectamente conocida, pues generalmente se ha hecho una obra para su exacta determinación. Pero en un aforo eventual es muy importante la elección de la sección de medida; para ello se deben observar ciertas condiciones:

1. La sección deberá estar situada en un tramo recto de, por lo menos, tres veces el ancho aguas arriba y dos aguas abajo.
  2. El régimen del río debe ser lo más tranquilo posible (fluvial y no torrencial). Deberán evitarse los remolinos y contracorrientes; tampoco son deseables las zonas de aguas muertas.
  3. La sección de aforo debe situarse perpendicular a la corriente.
  4. El lecho del río, sobre todo en secciones de poca profundidad, no deberá tener grandes piedras o vegetación que altere su régimen. Antes de comenzar el aforo conviene limpiar la sección elegida.
  5. Debe comprobarse que las velocidades extremas están dentro del campo de utilización de las fórmulas de calibrado del molinete.
- La fórmula de calibrado del molinete es:

$$V = a n + b$$

siendo "a" una constante, "n" el número de vueltas por segundo de la hélice, "V" la velocidad del agua, y "b" la velocidad de arranque del molinete, la cual, según normas americanas, debe ser superada doblemente por la velocidad mínima del agua.

Elegida la sección, antes de tomar medidas se debe decidir el número de secciones parciales a considerar y se tomarán las medidas sobre unas líneas verticales, que denominaremos verticales, que delimitan las secciones parciales.

Para situar las verticales deben seguirse los siguientes criterios.

- 1º. Hay que considerar las discontinuidades del perfil. Con este criterio se situarán en todos aquellos puntos donde exista cambio de pendiente de la línea de fondo. También deben considerarse como verticales los puntos de velocidad máxima. En la figura VI se muestran algunos ejemplos.

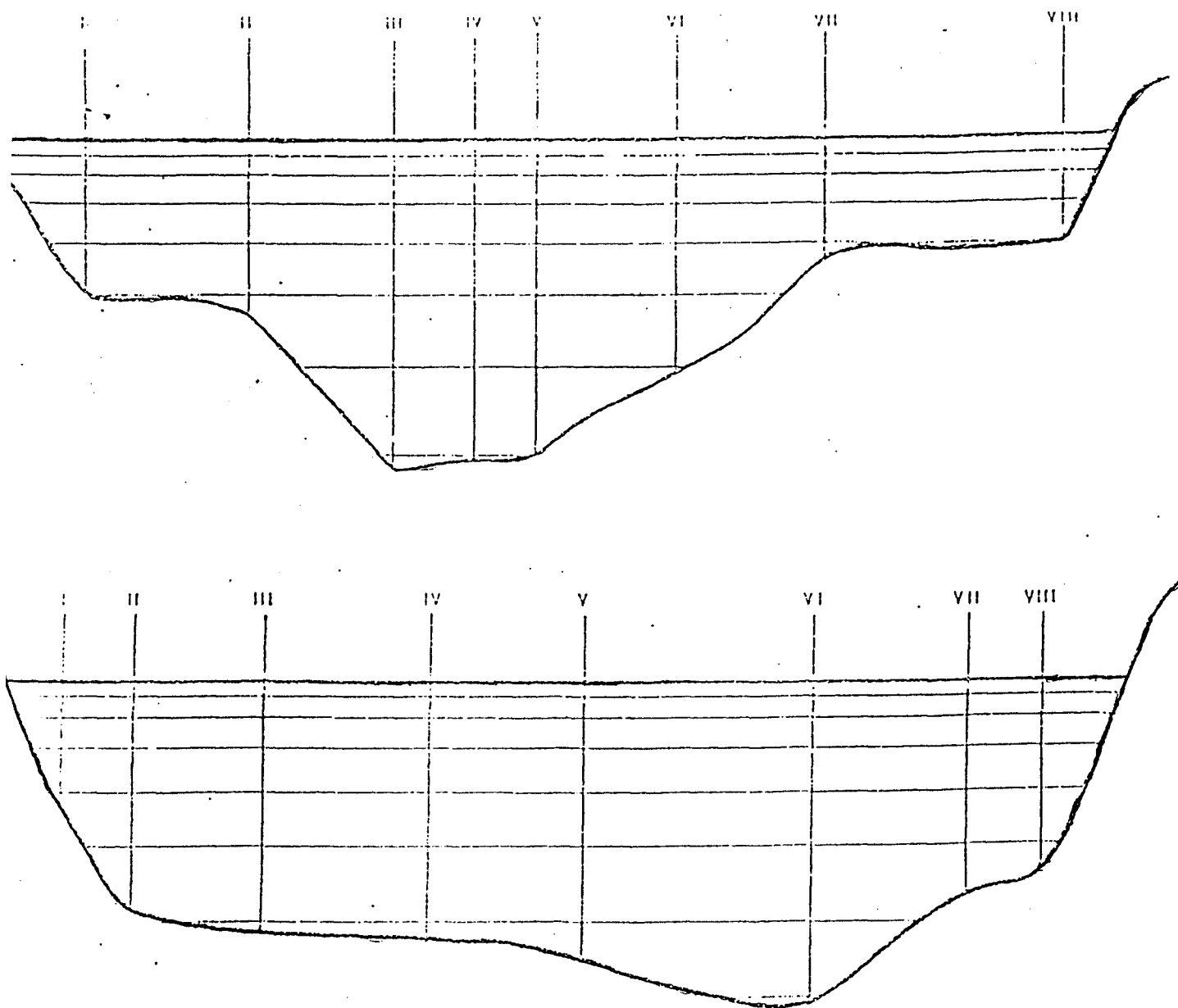


Figura VI

2º. Las verticales deben seleccionarse de tal forma que por cada sección parcial no pase más del 10% del caudal total.

Lógicamente, cuanto mayor es el número de verticales, mayor precisión se consigue en el cálculo del caudal, pero esto lleva acompañado un mayor costo del aforo. Por lo tanto, con una elección inteligente de las verticales se consigue una precisión aceptable con un mínimo costo. Generalmente con cierta experiencia es fácil encontrar las verticales esenciales.

#### 2.5.2. Medida de la velocidad.

Aquí es donde se emplea el molinete, que da nombre al método, pues éste proporciona la velocidad puntual de un fluido. El molinete, con contador normal, nos da el número de revoluciones de la hélice en un tiempo determinado. Con la fórmula de calibrado vista anteriormente

$$V = a n + b$$

se obtiene la velocidad. Esta relación debe venir adjuntada con el molinete.

Obtenidos los valores de la velocidad en varios puntos de una vertical, se calcula la velocidad media y con las dos velocidades medias de las dos verticales que definen una sección parcial se obtiene por media aritmética la velocidad media en la sección parcial.

La velocidad media de cada vertical será función del tiempo disponible, de la profundidad del agua, de las variaciones de nivel y de la precisión buscada, puede ser determinada por los siguientes métodos:

a) De la distribución de las velocidades.

El valor de la velocidad se obtiene con los datos de velocidades en numerosos puntos de cada vertical, siendo el espaciamiento entre ellos tal que la diferencia entre velocidades no sea superior al 20%. Las velocidades obtenidas en cada punto se llevan sobre un gráfico y la velocidad media se determina con un planímetro.

b) De los puntos.

Se toman las medidas de velocidad en los puntos

- \* cerca del fondo
- \* al 80% de la profundidad a partir de la superficie
- \* al 60% de la profundidad a partir de la superficie
- \* al 20% de la profundidad a partir de la superficie
- \* cerca de la superficie

Si por circunstancias (rapidez, profundidad de la lámina de agua, etc.) no se puede hacer en los 5 puntos, la experiencia demuestra que, si solo puede tomarse un punto de medida, éste sea el del 60% de profundidad; si son dos puntos, los del 20 y 80%; y para tres, los del 20, 60 y 80%.

c) De integración.

Aquí se desplaza el molinete sobre cada vertical a velocidad constante.

La velocidad de descenso no debe ser superior a 0,04 m/s. Se realizarán dos descensos sobre cada vertical y, si los resultados difieren más del 10%, se repetirán los descensos.

Para el cálculo de la velocidad media sobre la vertical, se determinará el número de vueltas medio y éste se introducirá en la fórmula del calibrado.

Este procedimiento se usa en aguas con profundidades mayores de 1 m.

2.5.3. Medida de la sección.

El área de las secciones parciales se determina midiendo, en cada sección de aforo, la profundidad de la lámina de agua y la distancia a la margen de cada una de las verticales.

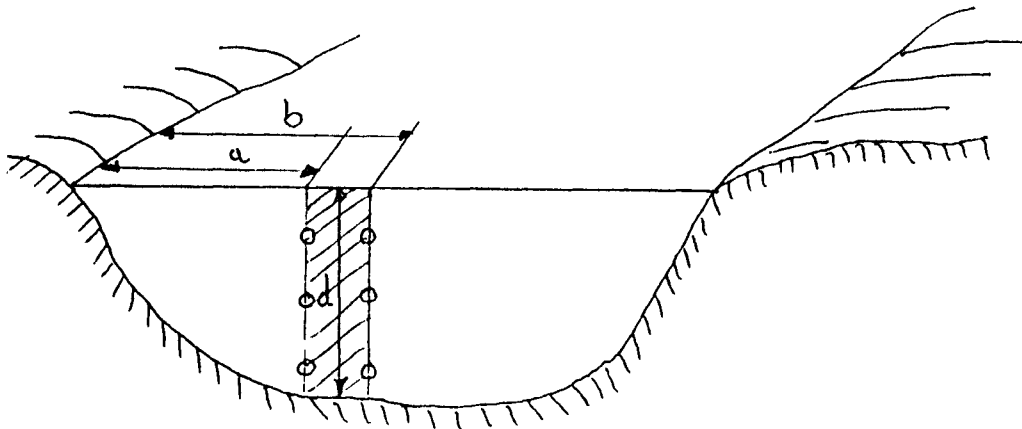


Figura VII

$$\text{Area} = d(b - a)$$

## 2.6. Cálculo del caudal.

Este se puede llevar a cabo por métodos gráficos o aritméticos, siendo estos últimos los menos laboriosos y los más utilizados. Además presentan la ventaja de su elaboración por ordenador. En concreto el Centro de Cálculo de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid dispone de un programa para cálculo por ordenador del aforo con molinete por el método de la sección media.

Pasemos a ver los métodos aritméticos:

\* Por la sección media.

Si  $V_1$  y  $V_2$  son las velocidades medias en las respectivas verticales I y II adyacentes,  $d_1$  y  $d_2$  las profundidades medias sobre las respectivas verticales, el caudal en cada sección parcial será

$$q = \frac{V_1 + V_2}{2} \cdot \frac{d_1 + d_2}{2} \cdot b$$

El caudal total valdrá

$$Q = \sum_{i=1}^n q_i$$

\* Por la semisección.

En este caso las verticales se consideran en la mitad de las secciones parciales y sobre esta vertical se miden la velocidad y la profundidad, siendo el caudal parcial:

$$q = V_1 d_1 \frac{b_1 + b_2}{2}$$

## 2.7. Molinetes.

El molinete consiste en una hélice que arrastra por medio de un tornillo sin fin una rueda dentada provista de un contacto eléctrico. El contacto cierra el circuito de un timbre o de un registrador de banda de papel cada 10, 20, 50 ó 100 revoluciones de la hélice. La velocidad del fluido es directamente proporcional al número de revoluciones de la hélice e inversamente proporcional al tiempo transcurrido entre dos timbrados consecutivos.

Pueden distinguirse dos tipos según el eje:

a) Molinete de eje vertical sin la hélice. La detección se hace mediante una rueda de cazoletas. Figura VIII.

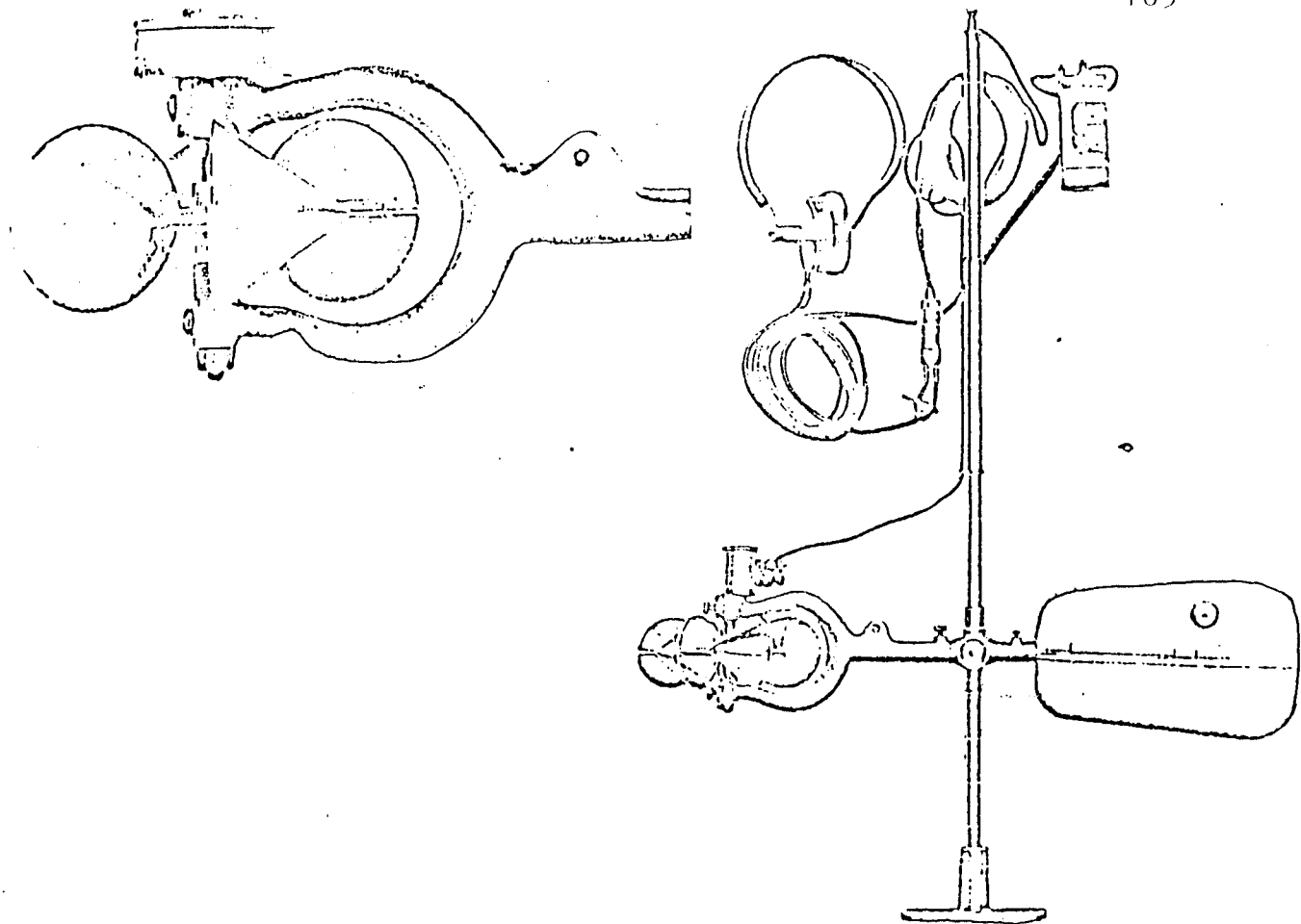
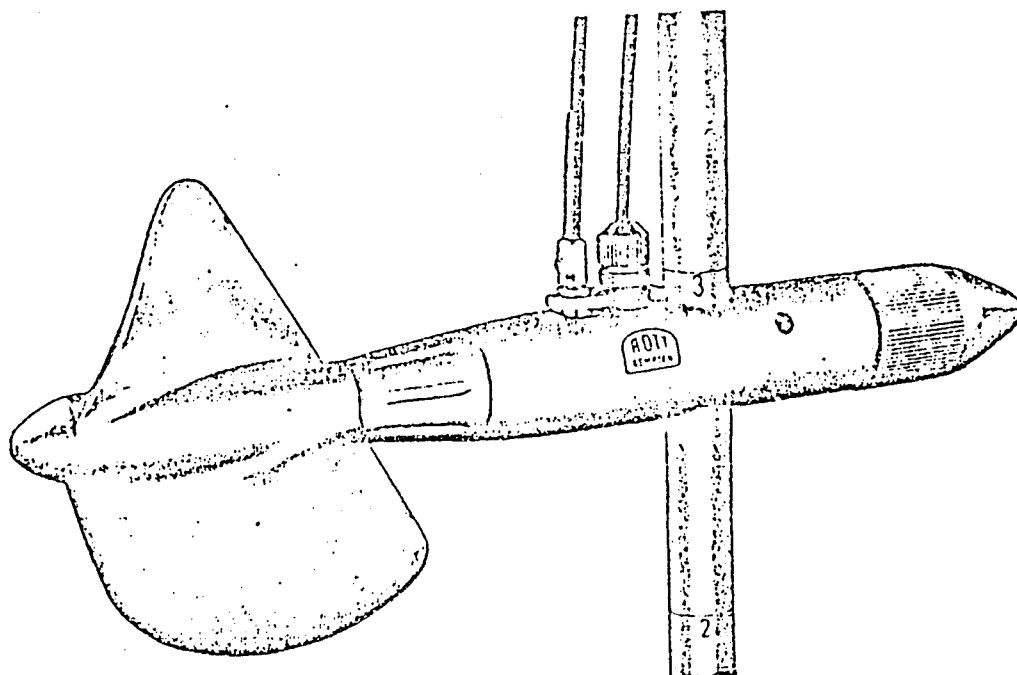


Figura VIII

Es muy utilizado en EE.UU.

b) Molinete de eje horizontal de hélice muy utilizado en Europa.

Figura IX.



Los molinetes se venden con un certificado de calibrado en el cual figura la fórmula para calcular la velocidad en función del número de vueltas por segundo. La relación es como se dijo anteriormente:

$$V = a n + b$$

El molinete de hélice, tipo OTT, es delicado y un pequeño golpe en la hélice puede deformarla y ser necesario un nuevo calibrado. Sin embargo, en los molinetes sin hélice todas sus piezas son recambiables y poseen una ecuación común para toda la serie de fabricación. Por contra, los molinetes sin hélice son menos precisos y no funcionan bien para velocidades mayores de 3,5 m/sg.

Una vez que se tiene el molinete según las circunstancias que concurren en el aforo, pueden utilizarse dos tipos de suspensión del molinete:

1ª. Con molinete montado sobre barra.

Las medidas se realizan con barras graduadas situadas verticalmente en el agua. Las barras están constituidas por elementos de 1 a 3 cm. que se empalman unos con otros.

Al aforar con barras se puede operar por vadeo, el cual es adecuado sólo para profundidades menores de 1 m, manteniéndose el operario lo más alejado posible del molinete y con las piernas abiertas en la dirección de la corriente; desde un punte, más recomendable que el anterior, pero para profundidades mayores de 3 m y velocidades superiores a 2 ó 3 m/sg., aumenta las vibraciones de la barra falseando las medidas; y en balsa.

2ª. Con molinete suspendido por cable.

En los casos donde el molinete se suspende de un cable es necesario fijarlo en el punto de medida elegido, lo que se consigue mediante un lastre llamado frecuentemente "salmón". El elemento molinete-salmón está suspendido de un cable y unido a un torno para la maniobra de descenso y subida, tal como muestra la Figura X.

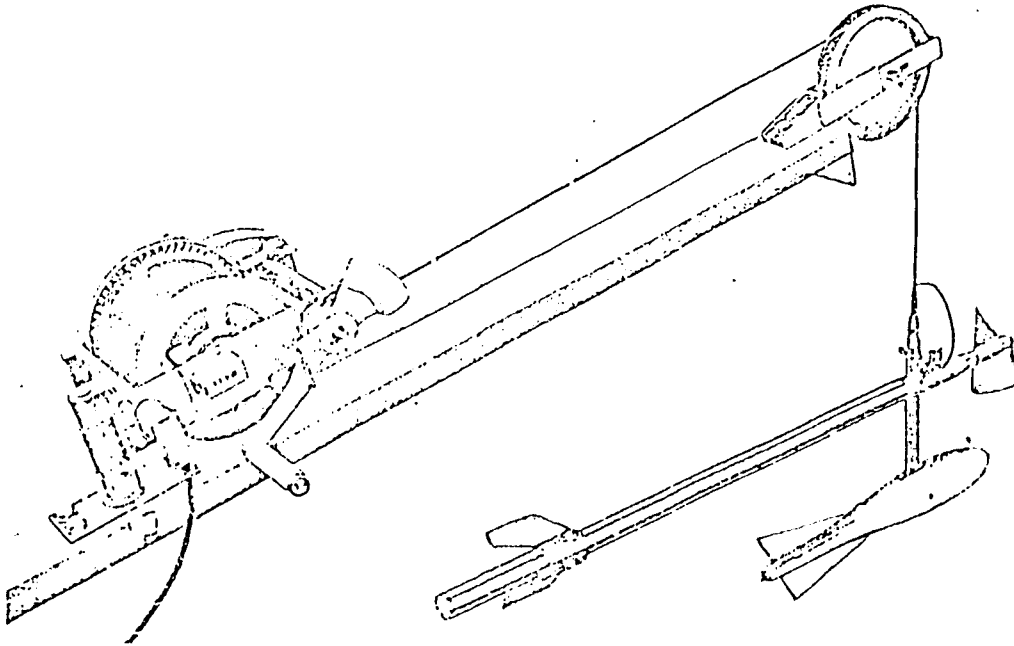


Figura X

Hay dos tipos de salmones:

- a) el salmón se fija por debajo del molinete (casi no se usa).
- b) el molinete se fija sobre la nariz del salmón mediante una pieza intermedia adecuada. Aguas abajo el salmón tiene un timón de aletas móviles que le obliga a situarse en la dirección de la corriente.

Actualmente es frecuente también que el cable sea electroportador, es decir, que transmita los impulsos producidos por los giros de la hélice al elemento contador, y al mismo tiempo es cable de suspensión.

El aforo suspendido por cable puede realizarse desde puentes, carro y cable, balsas o teleféricos.

Cuando la velocidad de la corriente es grande, el salmón y el cable son arrastrados y las medidas de profundidad resultan falseadas, tal como se aprecia en la Figura XI.

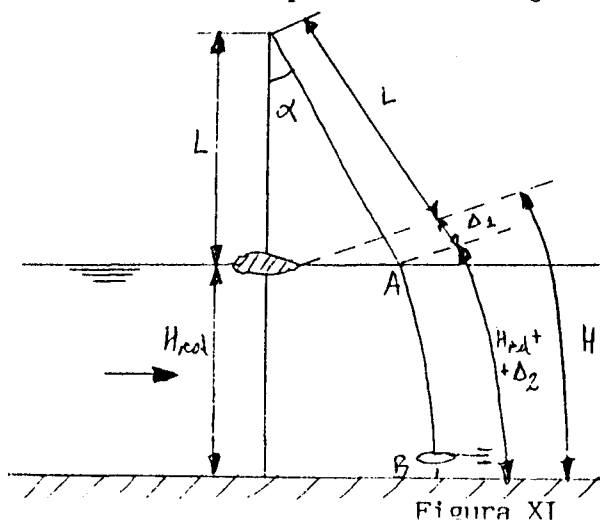


Figura XI



Se tienen dos excesos de longitudes respecto a la real. El exceso  $D_1$  del trozo de cable no sumergido, que es función de la distancia  $L$  y el ángulo , y el exceso  $D_2$  del cable sumergido, que es función de la longitud sumergida  $AB$  y del ángulo .

El error total es  $D_1 + D_2$  , por lo tanto la profundidad total real viene dada por

$$H_{\text{real}} = H - (D_1 + D_2)$$

De esto se deduce que para los aforos con arrastre es necesario medir el ángulo que el cable forma con la vertical y la altura ( $L$ ) desde el punto de suspensión del cable al nivel del agua.

Para el cálculo de los coeficientes de corrección en el aire  $D_1$  y en el agua  $D_2$  suelen utilizarse tablas especialmente preparadas para tal efecto.

# CORRECCION DEL CABLE EN EL AGUA

Corrección  $\Delta_2$  para ángulo vertical

12°	14°	16°	18°	20°	22°	24°	26°	28°	30°	32°	34°	36°	38°	40°	42°	44°	46°
0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	0.06	0.06	0.07	0.08	0.09	0.09	0.10	0.11
0.01	0.02	0.03	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.10	0.11	0.13	0.14	0.16	0.17	0.19	0.20	0.22
0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.08	0.09	0.11	0.13	0.15	0.17	0.19	0.21	0.23	0.26	0.28	0.31	0.33
0.03	0.04	0.05	0.07	0.08	0.10	0.12	0.14	0.17	0.19	0.22	0.25	0.28	0.31	0.34	0.38	0.41	0.44
0.04	0.05	0.07	0.08	0.11	0.13	0.15	0.18	0.21	0.24	0.28	0.31	0.35	0.39	0.43	0.47	0.51	0.55
0.04	0.06	0.08	0.10	0.13	0.15	0.18	0.22	0.25	0.29	0.33	0.38	0.42	0.47	0.52	0.56	0.61	0.66
0.05	0.07	0.09	0.12	0.15	0.17	0.21	0.25	0.29	0.34	0.39	0.44	0.49	0.55	0.60	0.66	0.71	0.77
0.06	0.08	0.10	0.13	0.17	0.20	0.24	0.29	0.34	0.39	0.44	0.50	0.56	0.62	0.69	0.75	0.82	0.88
0.06	0.09	0.12	0.15	0.19	0.23	0.27	0.32	0.38	0.44	0.50	0.56	0.63	0.70	0.77	0.85	0.92	0.99
0.07	0.10	0.13	0.17	0.21	0.26	0.31	0.36	0.42	0.48	0.55	0.63	0.70	0.78	0.86	0.94	1.02	1.11
0.08	0.10	0.14	0.18	0.23	0.28	0.34	0.40	0.46	0.53	0.61	0.69	0.77	0.86	0.95	1.03	1.12	1.22
0.08	0.11	0.16	0.20	0.25	0.31	0.37	0.43	0.50	0.58	0.66	0.75	0.84	0.94	1.03	1.13	1.22	1.33
0.09	0.12	0.17	0.21	0.27	0.33	0.40	0.47	0.55	0.63	0.72	0.81	0.91	1.01	1.12	1.22	1.33	1.44
0.10	0.13	0.18	0.23	0.29	0.36	0.43	0.50	0.59	0.68	0.77	0.88	0.98	1.09	1.20	1.32	1.43	1.55
0.11	0.14	0.20	0.25	0.32	0.38	0.46	0.54	0.63	0.73	0.83	0.94	1.05	1.17	1.29	1.41	1.53	1.66
0.11	0.15	0.21	0.26	0.34	0.41	0.49	0.58	0.67	0.78	0.88	1.00	1.12	1.25	1.38	1.50	1.63	1.77
0.12	0.16	0.22	0.28	0.36	0.43	0.52	0.61	0.71	0.82	0.94	1.06	1.19	1.33	1.46	1.60	1.73	1.88
0.13	0.17	0.23	0.30	0.38	0.46	0.55	0.65	0.76	0.87	0.99	1.13	1.26	1.40	1.55	1.69	1.84	1.99
0.13	0.18	0.25	0.31	0.40	0.48	0.58	0.68	0.80	0.92	1.05	1.19	1.33	1.48	1.63	1.79	1.94	2.10
0.14	0.19	0.26	0.33	0.42	0.51	0.61	0.72	0.84	0.97	1.10	1.25	1.40	1.56	1.72	1.88	2.04	2.21

14°	16°	18°	20°	22°	24°	26°	28°	30°	32°	34°	36°	38°	40°	42°	44°	46°
0.03	0.04	0.05	0.06	0.08	0.09	0.11	0.13	0.15	0.18	0.21	0.24	0.27	0.31	0.35	0.39	0.44
0.06	0.08	0.10	0.13	0.16	0.19	0.23	0.27	0.31	0.36	0.41	0.47	0.54	0.61	0.69	0.78	0.88
0.09	0.12	0.15	0.19	0.24	0.28	0.34	0.40	0.46	0.54	0.62	0.71	0.81	0.92	1.04	1.17	1.32
0.12	0.16	0.21	0.26	0.31	0.38	0.45	0.53	0.62	0.72	0.82	0.94	1.08	1.22	1.38	1.56	1.76
0.15	0.20	0.26	0.32	0.39	0.47	0.56	0.66	0.77	0.90	1.03	1.18	1.35	1.53	1.73	1.95	2.20
0.18	0.24	0.31	0.39	0.47	0.57	0.68	0.80	0.96	1.07	1.24	1.42	1.61	1.83	2.07	2.34	2.64
0.21	0.28	0.36	0.45	0.55	0.66	0.79	0.93	1.08	1.25	1.44	1.65	1.88	2.14	2.42	2.73	3.08
0.24	0.32	0.41	0.51	0.63	0.76	0.90	1.06	1.24	1.43	1.65	1.89	2.15	2.44	2.77	3.12	3.52
0.29	0.36	0.46	0.58	0.71	0.85	1.02	1.19	1.39	1.61	1.86	2.12	2.42	2.75	3.11	3.51	3.96
0.31	0.40	0.51	0.64	0.79	0.95	1.13	1.33	1.55	1.79	2.06	2.36	2.69	3.06	3.46	3.90	4.40
0.34	0.44	0.57	0.71	0.86	1.04	1.24	1.46	1.70	1.97	2.27	2.60	2.96	3.36	3.80	4.29	4.83
0.37	0.48	0.62	0.77	0.94	1.14	1.35	1.59	1.86	2.15	2.47	2.83	3.23	3.67	4.15	4.68	5.27
0.40	0.52	0.67	0.83	1.02	1.23	1.46	1.72	2.01	2.33	2.68	3.07	3.50	3.97	4.49	5.07	5.71
0.43	0.56	0.72	0.90	1.10	1.42	1.58	1.86	2.16	2.51	2.89	3.30	3.77	4.28	4.84	5.46	6.15
0.46	0.61	0.77	0.96	1.18	1.32	1.69	1.99	2.32	2.69	3.09	3.54	4.04	4.58	5.19	5.85	6.59
0.49	0.64	0.82	1.03	1.26	1.51	1.80	2.12	2.47	2.87	3.30	3.78	4.30	4.89	5.53	6.24	7.03
0.52	0.69	0.97	1.09	1.33	1.61	1.91	2.25	2.63	3.04	3.51	4.01	4.57	5.19	5.88	6.63	7.47
0.55	0.73	0.92	1.16	1.41	1.70	2.03	2.38	2.78	3.22	3.71	4.25	4.84	5.50	6.22	7.02	7.91
0.58	0.77	0.97	1.22	1.49	1.80	2.14	2.52	2.94	3.40	3.92	4.48	5.11	5.80	6.57	7.41	8.35
0.61	0.81	1.03	1.28	1.57	1.89	2.25	2.65	3.09	3.58	4.12	4.72	5.38	6.11	6.91	7.80	8.79

### 3. ESTACIONES DE AFORO.

#### 3.1. Introducción.

Para conocer el régimen de un río, es decir, el  $Q = f(t)$ , que es el objeto de toda estación de aforo, sería necesaria la realización de un enorme trabajo de por lo menos un aforo diario, que resulta antieconómico. Para ello se utilizan las llamadas "Estaciones de aforo" donde, mediante medidas sistemáticas del nivel de agua con escala limnimétrica o limnigrafo, se conoce la curva  $H = f(t)$ . Por otra parte, la realización de aforos periódicos con molinete u otros métodos, permite conocer los caudales  $Q_1, Q_2, Q_3 \dots Q_n$  para las correspondientes alturas limnimétricas  $H_1, H_2, H_3 \dots H_n$  con las cuales podemos establecer la correspondiente "curva de gastos"  $Q = f(H)$  de la estación. Con las curvas  $H = f(t)$  y  $Q = f(H)$  se determina la curva  $Q = f(t)$ . Si los caudales los vamos a deducir de las medidas de nivel de agua en la escala, es muy importante considerar las condiciones hidráulicas que toda estación debe cumplir para que la función  $Q = f(H)$  sea única. Para ello es necesario que el régimen sea uniforme, o sea que la sección mojada sea constante. Las condiciones para que un régimen sea estrictamente uniforme no pueden ser obtenidas en la práctica más que mediante canales artificiales, donde la sección y pendiente se mantienen constantes.

En los cursos de agua naturales es prácticamente imposible conseguir una estabilidad perfecta de la sección y además las frecuentes alteraciones del fondo, sobre todo aguas abajo, hacen que se modifiquen las pendientes de la lámina de agua. Sin embargo, las variaciones, en una zona convenientemente elegida, suelen ser frecuentemente tan pequeñas que son despreciables frente a los errores de medida cometidos en las medidas de caudal y de nivel de agua.

En general no existe ninguna sección en el terreno que cumpla con todas las condiciones, tanto de forma como hidráulicas, por lo que muchas veces es necesaria la realización de obras para conseguir las condiciones idóneas. Es conveniente señalar que el tiempo que se pierde en situar una estación estará ampliamente recompensa

do por el mejor conocimiento del río y la facilidad de interpretación de los datos obtenidos.

Esencialmente toda estación de aforo consta de las siguientes partes:

- Sección limnimétrica y/o limnigráfica.
- Sección de aforos.
- Control.

### 3.2. Sección limnimétrica.

El nivel de agua es una medida puntual que se realiza en la escala limnimétrica y representa las condiciones de la superficie del agua en la sección en que se realiza.

Las condiciones que deben cumplirse en una sección limnimétrica son:

#### a) Estabilidad.

La sección donde se sitúa la escala o limnigrafo no debe sufrir alteraciones por erosiones, depósitos o crecimiento de la vegetación. Por razones hidráulicas estas condiciones deben entenderse aguas arriba y abajo de la sección.

#### b) Sensibilidad.

Esta propiedad se refiere a que a una pequeña variación del caudal le corresponda una variación  $d/H$  suficientemente grande de la lectura de la escala. La sensibilidad está pues caracterizada por el valor  $dH/dQ$  (en cm por  $m^3/sg.$ ). Vemos, pues, que la sección más sensible es la que tiene forma de V.

#### c) Ausencia de oleaje.

La presencia de oleaje, sobre todo en crecidas, produce grandes errores en la determinación de la lectura del nivel de agua. En este caso es necesario utilizar pozos tranquilizantes contruidos en la orilla del río. La escala se coloca en el interior del pozo.

#### d) Fácil acceso.

Si el observador tiene dificultades en llegar a la escala, no podrá hacer las lecturas con la necesaria tranquilidad y en consecuencia serán de poca calidad.

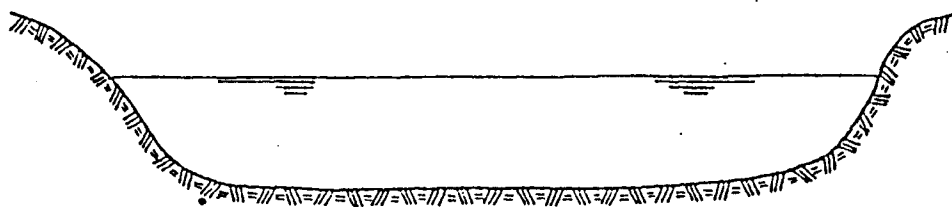
### 3.3. Sección de aforos.

Deben tomarse las precauciones que anteriormente se expresaron

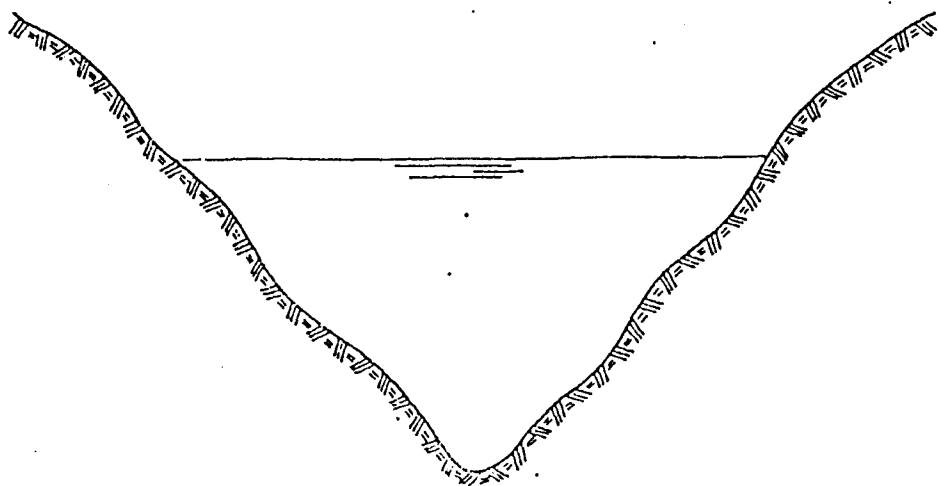
en la elección de sección por aforo con molinete, y además asegurarse que la sección es capaz de contener todos los caudales que presente el río.

El aforo debe efectuarse en lo posible siempre en la misma sección y en las mismas verticales, para lo cual debe situarse perpendicularmente a la dirección de la corriente y señalizarse en ambas orillas con dos estacas, lo que permitirá la idéntica realización del aforo ante eventuales cambios de aforador.

Una buena sección de aforo no tiene porqué ser una buena sección limnimétrica. En una estación es conveniente que ambas estén próximas, sin aportes o pérdidas entre ellas.



Buena sección de aforos



Buena sección limnimétrica

Figura XII

### 3.4. Control.

Los ríos dependen de las condiciones aguas abajo y quedan influenciadas a partir del control donde se produce un aumento suficiente de la velocidad del agua para pasar del régimen fluvial al torrencial.

Este régimen crítico, del paso del régimen fluvial al torrencial, puede producirse por un reborde natural o artificial que definimos como "control". Cuando no se puede encontrar un control natural estable se recurre a obras artificiales.

### 3.5. Clasificación de las estaciones.

#### \* De primer orden.

Están dotadas de un registro continuo de niveles (limnigrafos) y de un sistema de aforo que permite las medidas de caudal durante las crecidas. Estas estaciones permiten obtener datos con facilidad y constituyen la red primaria o de base del país. Dado su carácter permanente exigen obras de gran envergadura que garanticen su continuidad. Este es el caso de las estaciones del M.O.P.U.

#### \* De segundo orden.

Se caracterizan por tener un registro que puede no ser continuo, es decir, estar dotadas de escala pero no de limnigrafo. Suelen acondicionarse con obras, pero de menor importancia que las anteriores.

#### \* De tercer orden.

Se instalan con objeto de estudios especiales o para el estudio del régimen del río antes del proyecto y construcción de la estación definitiva. Tienen carácter de no permanentes.

En general, en nuestro país las estaciones son de este tercer tipo y el hidrogeólogo debe valerse de los recursos técnicos que le brinda la hidrometría para conseguir resultados aceptables con un mínimo de inversión. A veces se utilizan como estaciones de aforo las centrales hidroeléctricas o presas.

#### 4. CURVA DE CAUDALES. CALCULO DE CAUDALES MEDIOS.

##### 4.1. Ecuación y forma de la curva de caudales o gastos.

Como se expresó anteriormente, la curva de caudales o curva de gastos, que es lo mismo, relaciona el caudal con la altura limnimétrica  $Q = f(H)$ .

Experimentalmente se ha comprobado que puede expresarse mediante la ecuación de una parábola del eje de las alturas de la forma

$$Q = K (H - H_0)^n$$

siendo  $K$  un coeficiente y  $H$  la altura limnimétrica cuyo caudal queremos determinar y  $H_0$  la altura limnimétrica correspondiente al caudal cero, como se aprecia en la figura XIII.

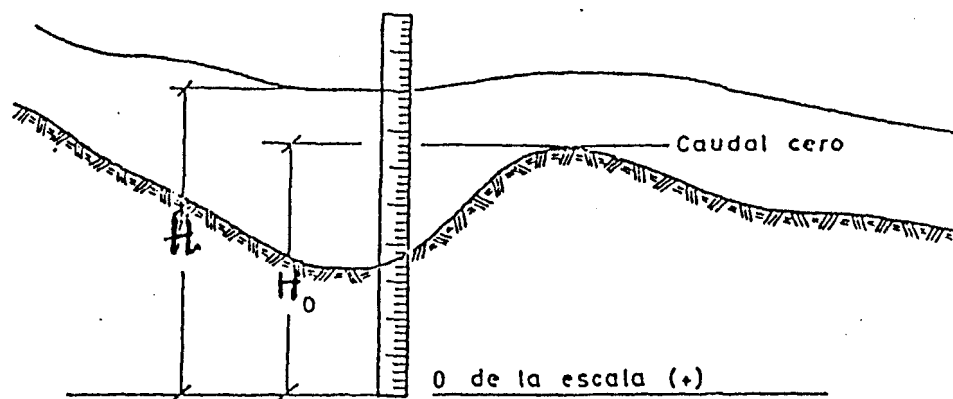


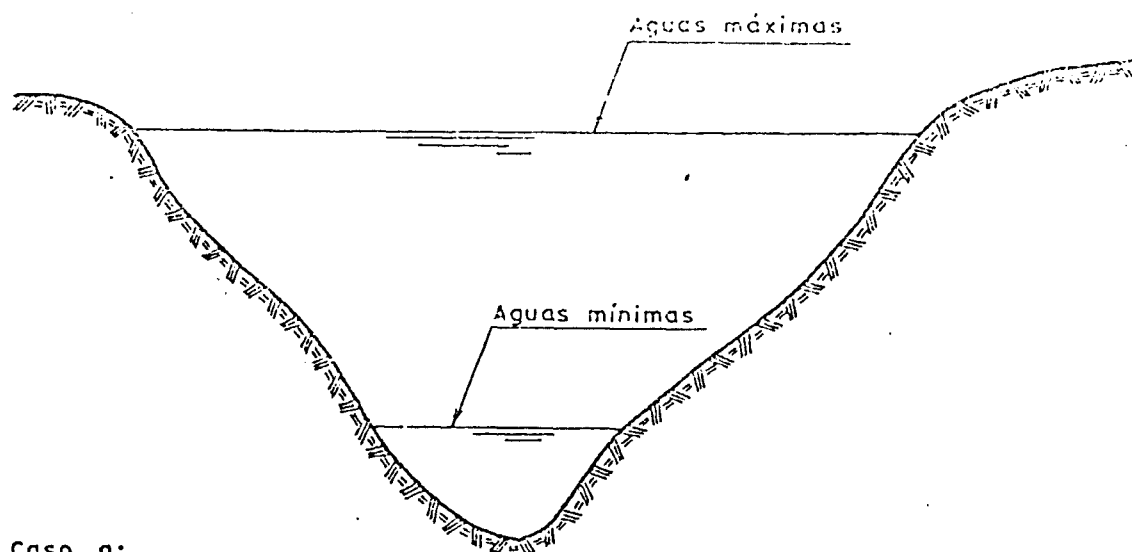
Figura XIII

En la práctica, y dado que es más fácil ajustar una recta, se trabaja en papel bilogarítmico y la ecuación se transforma en

$$\log Q = \log K + n \log (H - H_0)$$

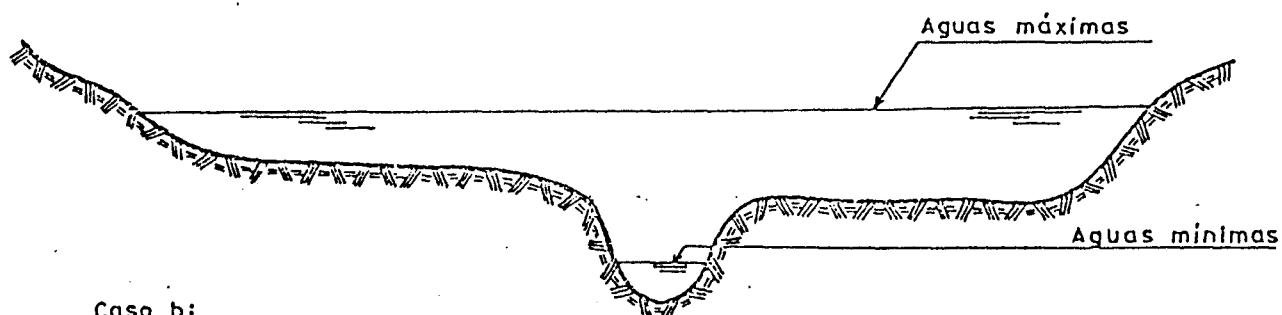
Las curvas de gastos pueden ser simples o compuestas, según la forma de la sección limnimétrica. En el caso a) de la Figura XIV será simple y en los otros casos, compuesta.





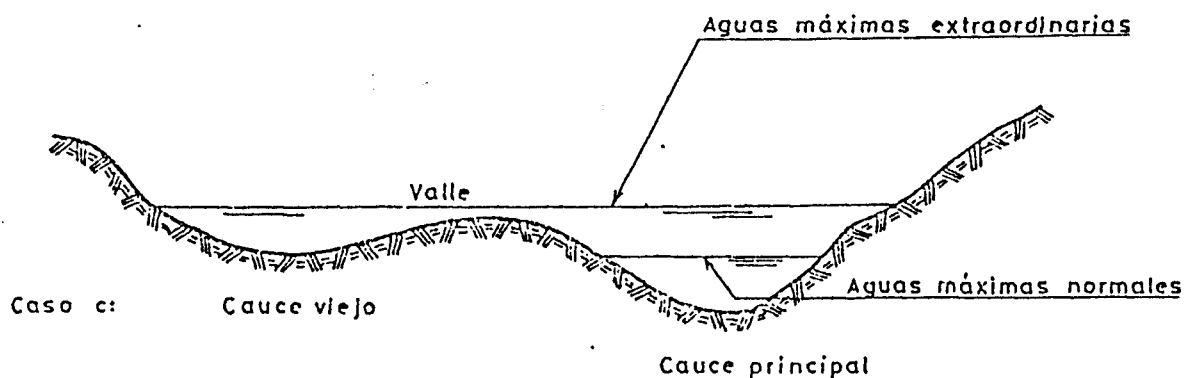
Caso a:

Este tipo de perfil generalmente se presenta en ríos de montaña



Caso b:

Este tipo de perfil es común en las tierras bajas llanuras



Caso c:

Cauce viejo

Cauce principal

Figura XIV

#### 4.2. Errores en los aforos.

Se pueden aceptar como buenos aforos los que tengan una dispersión del  $\pm 5\%$  respecto a la curva de caudales. Si hay aforos que se separan claramente de la curva, este error puede ser por:

- a) Mala identificación del aforo, habrá que comprobar fecha, nombre de la estación, número de estación, número de aforo, etc.
- b) Defectuosa lectura de la medida de la altura de escala.

Hay que observar si se han producido cambios en la sección limnimétrica por erosión o depósito.

Debe verificarse la lectura por correlación con lecturas de otras escalas situadas aguas arriba y abajo.

En muchas ocasiones se producen controles naturales (después de crecidas o estiajes) que cambian las alturas de escala.

- c) Error en el valor del aforo por:

Modificación de la sección, por cambio de lugar de toma de datos, por cambio de molinete, por acumulación de algas o partículas en la hélice, etc.

Normalmente para que exista un cambio de curva debe haber un suceso hidrológico como una crecida, fuerte erosión, etc. que lo justifique. Es importante para definir una curva de gastos especificar el período de validez.

#### 4.3. Determinación de los caudales medios diarios.

Con los datos de altura de la lámina de agua, obtenidos por lecturas en la escala o con registros continuos mediante limnigrafos y con ayuda de la curva de caudales obtenemos los valores de los caudales medios diarios.

Para obtener el caudal medio diario podemos partir de:

- a) Lecturas en la escala.

- cuando disponemos de una sola lectura limnimétrica por día se traduce directamente esta lectura a caudal, suponiendo que ella es representativa del caudal medio diario.
- cuando se dispone de dos lecturas limnimétricas diarias, se promedian ambos valores y este promedio se traduce en caudal o se traduce cada lectura a caudal y se determina el caudal medio diario como media de ambos valores.

En ambos casos hay que especificar con cuántas lecturas están hechos los cálculos.

b) Limmígrafos.

Hay dos métodos gráficos para calcular la altura media diaria del nivel.

- 1º) Se coloca sobre la curva del limnógrafo una hoja transparente en la que se ha trazado una línea graduada como indica la figura XV.

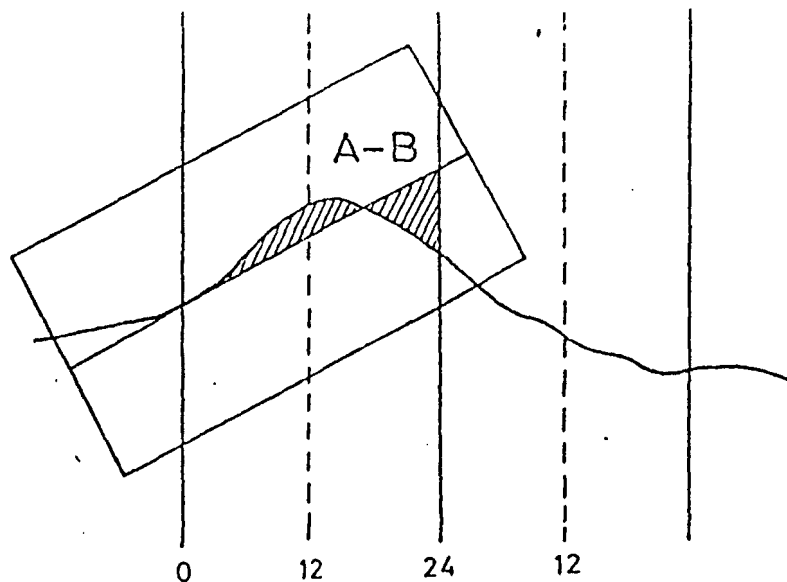


Figura XV

Equilibrada visualmente el área A con el área B, se lee la altura media diaria en la intersección de la línea graduada con la línea de mediodía en la escala de tiempo.

- 2º) Se coloca la hoja transparente en posición horizontal como se ve en la figura XVI.

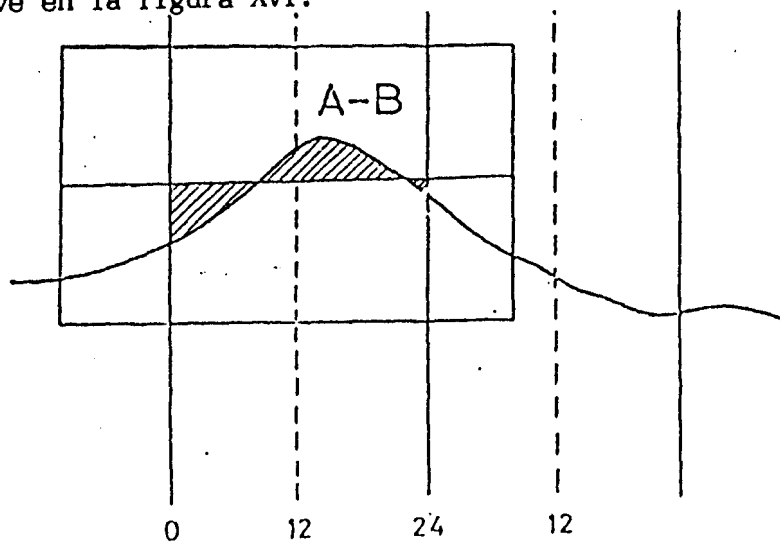


Figura XVI

La línea que pasa por el nivel que equilibra las superficies sobre y bajo esta línea con la curva del limnigrama nos da el nivel medio diario.

Si se quiere mayor precisión se subdividen los períodos en tiempos menores  $t_n$ , para cada uno su nivel medio y luego el caudal  $q_n$  que le corresponda. El caudal medio diario se calcula ponderando

$$Q = \frac{q_1 t_1 + q_2 t_2 + \dots}{24}$$

Posteriormente se procede a la verificación de los datos, identificando la estación, características, integridad de los datos de caudales medios diarios, cálculo de los caudales medios mensuales y anuales, caudal máximo y mínimo. Estas comprobaciones se hacen generalmente a simple vista, sin entrar en detalles. Por el contrario, en la detección y corrección de errores, se comparan los valores calculados en una estación con otro elemento afín, tal como la lluvia, o caudales de otra estación situada en el mismo río o en la misma cuenca o en cuencas vecinas de igual régimen. Esto se basa en el hecho de la proporcionalidad que debe existir en una cuenca homogénea entre sus precipitaciones medidas en varias estaciones y caudales y entre caudales entre sí.

BIBLIOGRAFIA.

- 1.- Claudio MATAIX. Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas.  
Ed. Castillo.
- 2.- G. REMENIERAS. Tratado de Hidrología Aplicada. Editores Técnicos  
Asociados.
- 3.- George RUSSELL. Hidráulica. 10ª edición. Ed. C.E.C.S.A.
- 4.- Melchor SENENT. XIV Curso de Hidrogeología aplicada. Ed. I.G.M.E.
- 5.- Victor STREETER / WILSE. Mecánica de los fluidos. 6ª edición.  
Ed. McGraw-Hill.

PERFORACION A PERCUSION

Jesús Candil Gonzalo  
Ingeniero de Minas  
Instituto Geológico y Minero  
de España

I N D I C E

- I) INTRODUCCION
- II) EQUIPO DE PERFORACION
- III) SARTA DE PERFORACION
- IV) FLUIDO DE PERFORACION
- V) FORMACIONES MAS ADECUADAS PARA PERFORAR A PERCUSION
- VI) PROBLEMAS MAS FRECUENTES EN LA PERFORACION Y SU TRA  
TAMIENTO
- VII) CONSIDERACIONES ECONOMICAS
- VIII) CRITICA DEL METODO: VENTAJAS E INCONVENIENTES

## I) INTRODUCCION

El método de perforación a percusión es el más antiguo, - existiendo referencias históricas que se remontan hasta el año 2.000 A. de C. en China, alcanzándose profundidades superiores a los 200 m. mediante balancín contrapesado que se accionaba -- por un extremo mediante tiro humano mientras por el otro la herramienta percutora colgaba del "cable" formado mediante cañas de bambú. En 1.859 en Pensilvania, el Coronel Drake realiza el primer pozo de petróleo del que se tienen noticias, precisamente mediante el método de percusión. De aquí que este método también se denomina sistema Pensilvaniense.

En el llamado sistema Canadiense, la herramienta pendía - de varillas roscadas. El avance en la técnica de fabricación de cables ha eliminado este sistema.

La filosofía general de cualquier método de perforación - consiste en la destrucción de la formación a perforar, evacuación a superficie del producto de esa destrucción "detritus" y continuidad en el proceso hasta alcanzar la profundidad deseada. Según la solución a cada una de las etapas del proceso se clasificarán los distintos métodos. Seguidamente se expone como son resueltas por el denominado a percusión.

### Destrucción de la formación

Se realiza por el impacto producido mediante caída libre de una herramienta pesada llamada trépano sobre la formación.

### Evacuación del detritus

La extracción del detritus producido se realiza mediante

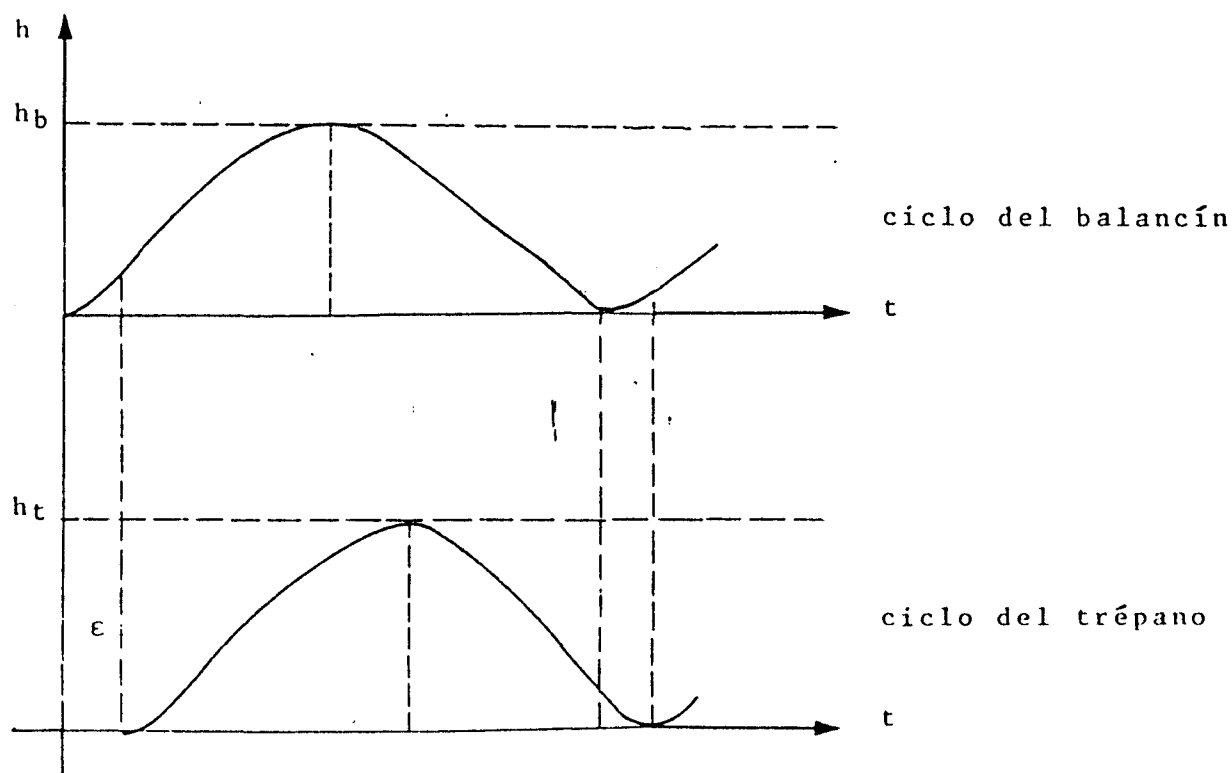


una herramienta cilíndrica hueca provista en su fondo de una válvula de retención. A esta herramienta se denomina cuchara o válvula.

### Continuidad en el proceso

La continuidad en el proceso se logra con un movimiento alternativo de subida y caída libre del trépano y que se obtiene mediante un mecanismo de biela y manivela. El cable que soporta la herramienta pasa por una polea situada en el extremo superior de la torre y desciende hasta el balancín, el cual al ser arrastrado por el mecanismo biela/manivela produce un movimiento alternativo, obligando al cable a seguir el mismo movimiento y provocando en definitiva el ciclo de subida y bajada del trépano.

El ciclo que describe el balancín y el trépano no son exactamente iguales ya que:



$\epsilon$  : función de la deformación elástica del cable.

$h_b < h_t$  : función de la energía cinética que lleva el trépano en su ascenso.

## II) EQUIPO DE PERFORACION

El equipo de perforación suele ir montado sobre camión y responde básicamente al esquema que se presenta en la figura -- que se adjunta (fig. 1), siendo sus componentes fundamentales:

- balancín
- tambor de perforar
- tambor de limpieza
- tambor de entubación
- torre

Las variables sobre las que se puede actuar son las siguientes:

### 1) Altura de caída del trépano

Generalmente suele variar entre 30 y 90 cm. Para regularla - se actúa sobre la longitud "útil" de la manivela.

### 2) Velocidad del balancín

Se regula actuando sobre el acelerador o bien la caja de cambios. Las frecuencias de golpeo oscilan entre 30 y 60 golpes por minuto. La frecuencia de golpeo es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la altura de elevación.

### 3) Longitud total de cable

Accionando el tambor sobre el que va enrollado. El control del cable durante la perforación es fundamental, debiendo el sondista estar "cogido al cable" en todo momento, ya que, a través del cable es como se obtiene la información de cualquier anomalía en el proceso de la perforación.

Seguidamente se detallan las características más importantes

tes de equipos usuales en España:

Tipo	CV.	Ø Cable	kg. Peso herra.	Torre (m)	Tiro (kg)	Capacidad H(m) Ø(mm)	
S.S. 72	85	22	2.000	14	20.000	300	450
S.S. 81	140	26	3.500	14	25.000	500	500
S.S. 800	150	28	4.000	15,6	75.000	700	800
S.P. 600	83	22	2.500	15,5	22.000	600	600

### III) SARTA DE PERFORACION

De abajo a arriba los elementos que componen la Sarta son: Trépano, barrón, tijera, montera y cable. Seguidamente se describe brevemente cada uno de ellos.

#### Trépano

Es la herramienta que golpea directamente sobre el fondo del sondeo. En un trépano se pueden distinguir las siguientes partes:

Cuello: Parte cilíndrica situada inmediatamente debajo de la rosca.

Cuadro de llave: Estrangulamiento de sección cuadrada sobre el que se agarran las llaves para aflojar o apretar la herramienta sobre el barrón.

Cuerpo del trépano: Parte principal que forman las guías.

Canales de agua: Precisión de la perforación no ocupada por el cuerpo del trépano y separada por sus guías.

Boca: Extremo que golpea en el fondo, junto con la superficie de desgaste son las partes del trépano -

que sufren la abrasión. Su mantenimiento se realiza mediante recarga con electrodos especiales. -- Primeramente mediante un electrodo blando de dureza intermedia entre el material del trépano y la de un electrodo duro se realiza un "almohadillado" que sirve de base al electrodo duro que es el encargado de formar el filo.

Los parámetros que caracterizan la boca de un trépano son los siguientes:

- a) Angulo de escape: Es la conicidad por encima de la superficie de desgaste.
- b) Angulo de penetración: Es el ángulo que forma el filo del corte.
- c) Superficie de desgaste: Parte del trépano en contacto directo con la pared del sondeo y por consiguiente, la que determina su diámetro.
- d) Cara trituradora: Es la superficie inferior -- del trépano. Se expresa en % de la Sección del sondeo.
- e) Borde de ensanche: Es el filo exterior del trépano y se mide en % sobre la longitud de la -- circunferencia total del sondeo.
- f) Perfil del borde de penetración: Puede ser recto, concavo o convexo.

Otra característica del trépano es el número de guías o bocas, que puede oscilar entre 2 y 6, siendo los más frecuentes de 4 ó 5.

### Barrón

Es una barra de carga, su misión consiste pues en proporcionar peso a la sarta. Va roscado al trépano por un lado y a la tijera por el otro, a veces no se perfora con tijera y su unión es con la montera. Su peso suele oscilar entre 500 y 1.500 kg.

### Tijera

También se denomina destrabador, está formada por dos eslabones engarzados que permiten un juego libre de unos 30 cm. - Su función es unicamente de seguridad, ya que permite el golpeo hacia arriba en un supuesto de enganche del trépano.

### Montera

Tiene como misión unir el resto de la sarta con el cable. La unión de la montera con el cable será tal que permita el giro libre de la sarta sobre su eje.

### El Cable

Sus dimensiones y características están determinadas por el peso de la herramienta y longitud total a perforar. Debe ser flexible para adaptarse a las curvaturas de las poleas. La tensión del cable de perforar será siempre a la izquierda, con objeto de que su tendencia sea a apretar las mismas roscadas de la sarta. (Son roscas a derecha).

## IV) FLUIDO DE PERFORACION

En este método de perforación no existe circuito contínuo de extracción de detritus. Ya se indicaba en la introducción -- que esta extracción se hacia para "limpieza" periódica del fon-

do del sondeo mediante una válvula o cuchara.

La mezcla del detritus y el agua forman el lodo de perforación cuyas características deberán ser vigiladas ya que, si el lodo es muy espeso dificultará la caída de la herramienta, absorbiendo una parte de la energía destinada al golpeo y habrá que añadir una segunda pérdida de energía destinada a triturar aún más finamente los detritus contenidos por exceso en ese lodo. Será necesario aclarar el lodo, bien mediante valvuleo, caso de haber cortado ya suficiente agua en la perforación, bien añadiendo agua, caso de no haber cortado todavía agua suficiente en la perforación.

Cuando se limpia muy frecuentemente, al aclarar el lodo, disminuye su capacidad para mantener en flotación el detritus y se produce su precipitación, actuando entonces el detritus como un "colchon" en el fondo del sondeo que absorbe practicamente toda la energía del golpeo y no permite el avance.

A veces se añade, arcilla o bentonita para conseguir el lodo capaz de levantar el detritus y evitar ese efecto "colchon".

#### V) FORMACIONES MAS ADECUADAS PARA PERFORAR A PERCUSION

La formaciones óptimas para este método son aquellas que reúnen dos características: poca dureza y estabilidad de paredes. La primera característica favorece el rendimiento en el avance y la segunda evita los riesgos de una pesca o bien la necesidad de entubaciones auxiliares. Formaciones que suelen reunir estas características son las constituidas por: Arcillas -- arenosas, ciertas margas, calcarenitas y determinadas calizas.

No obstante, con este método se puede perforar cualquier tipo de formación, pero su rendimiento baja considerablemente con la dureza y en formaciones poco consistentes (detritico) la

necesidad de entubaciones auxiliares sucesivas puede ser tal, - que sea imposible proseguir la perforación por pérdida de diámetro.

En formaciones que puedan provocar desprendimientos, (poca estabilidad en las paredes del sondeo), hay que llevar tijera en la sarta. Sin embargo, cuando no existe peligro de des- - prendimiento, se suele prescindir de esta herramienta lo cual - favorece los rendimientos. Recuerdese, que el objetivo de la tijera es poder golpear hacia arriba en caso de agarre del trépano. Al prescindir de la tijera se evita la pérdida de energía - que se produce en esta herramienta por su peculiaridad constructiva.

Seguidamente se dan las características que debe reunir - el trépano en función de distintos tipos de materiales a perforar.

<u>Formación</u>	<u>Angulo P.</u>	<u>Angulo E.</u>	<u>S. Desg.</u>	<u>C. Trit.</u>	<u>Función Principal</u>
Caliza blanda	Agudo	Grande	Pequeña	Grande	Penetrar
" dura	Obtuso	Grande	Pequeña	Grande	Penetrar
" abrasiva	Obtuso	Pequeño	Grande	Normal	Penetrar y escariar
Arcillas	Agudo	Grande	Pequeña	Grande	Mezclar
Granito	Obtuso	Pequeño	Grande	Pequeña	Penetrar y escariar

#### VI) PROBLEMAS MAS FRECUENTES EN LA PERFORACION Y SU TRATAMIENTO

Los problemas más frecuentes que se pueden presentar son los siguientes:

a) Pérdida de verticalidad.

- b) Atravesar zonas con una karstificación muy desarrollada.
- c) Inestabilidad de las paredes del sondeo.
- d) Niveles expansivos.

a) Pérdida de verticalidad

La pérdida de verticalidad está asociada al buzamiento de los estratos. Cuando el buzamiento es inferior a  $45^\circ$  el sondeo tiende a desviarse hacia la perpendicular al buzamiento. Si el buzamiento es superior a los  $45^\circ$  el sondeo tiende a desviarse paralelamente a los estratos.

Cuando el sondista se percata de la desviación (la sarta no gira), deberá rellenar la parte de sondeo desviada de un material más duro que el de la formación y volver a perforar.

En buzamientos fuertes con alternancia capa dura-capas blandas la propensión al desvío es muy grande y a veces se perfora primeramente un sondeo piloto de pequeño diámetro -- que servirá de guía para la perforación definitiva.

b) Zonas con karstificación muy desarrollada

A veces la karstificación es de tal calibre que forma cavernas de varios metros de altura. El avance de la perforación supone resolver los dos problemas que se plantean en tal situación: Desviación del sondeo y aumento considerable del riesgo de pérdida de herramienta con "pesca" a veces muy difíciles.

En tal circunstancia se procederá a la entubación del sondeo hasta el fondo de la caverna. La entubación servirá de guía para mantener la verticalidad y evitará el riesgo de pérdida de herramienta.



c) Inestabilidad de paredes

La inestabilidad de paredes está asociada a las formaciones poco consolidadas siendo este fenómeno típico en las formaciones detríticas, deposiciones basales y zonas milomitizadas. Cuando el sondista recibe el aviso de este riesgo, a través de pequeños "agarres" deberá entubar el sondeo y así llevar protegida la sarta. Cuando se sepa de antemano que las formaciones que se van a perforar están poco consolidadas, habrá que proyectar el inicio del pozo con diámetro suficiente para que a pesar de las pérdidas de diámetro debidas a entubaciones sucesivas se pueda alcanzar la profundidad prevista.

d) Niveles expansivos

A veces se atraviesan determinadas arcillas o margas que si bien en su estado originario no ofrecen mayor problema si lo ofrecen al entrar en contacto con el agua. Este agua puede proceder, tanto de un nivel acuífero superior o bien de un nivel con carga inferior. La hidratación de estos materiales produce un efecto expansivo que puede llegar a colapsar la entubación definitiva. En estos casos además de entubar con 8 mm. de espesor, se procurará dejar suficiente espacio anular entre tubería y pared del sondeo de modo que este espacio anular haga un efecto "junta de dilatación" y evite la sobrecarga en la tubería.

Cuando la herramienta queda acunada en el sondeo y se está perforando sin tijera, el sistema que se usa para soltar el agarre, consiste en mantener el cable de perforar en tensión y utilizando este mismo cable como guía, descolgar sujetada con el cable de limpieza una herramienta llamada golpeador que produzca un impacto sobre la montera que junto

con la tensión del cable de perforar suele ser suficiente para resolver la situación.

A veces por rotura en algún punto de la sarta habrá que realizar la consiguiente operación de pesca. Para el éxito de cualquier operación de pesca es imprescindible saber cual es la disposición exacta en el sondeo de los elementos a pescar, seguidamente se bajará el "pescador" que se considere más apropiado. La sarta que se utiliza en la "pesca" tiene unas características especiales que la hacen distinta de la sarta de perforación. Es una sarta que de abajo a arriba está compuesta por: el pescador, la tijera de pesca, el barrón de pesca y la montera de pesca.

La tijera de pesca, se diferencia de la tijera de perforar en la mayor longitud del recorrido de eslabón (1 m.). El barrón de pesca, es más corto y menos pesado que el barrón de perforar, se sitúa encima de la tijera con el fin de proporcionar masa al golpeo hacia arriba. La montera de pesca, es una montera que se diferencia de la de perforar por su característica antigiratoria.

El pescador más eficaz es la campana de círculo completo, que permite pescar a un diámetro previamente fijado, usando las cuñas adecuadas. Además una vez realizado el agarre, es fácil soltar la campana y extraerla si se considera más interesante una maniobra distinta.

## VII) CONSIDERACIONES ECONOMICAS

El coste horario del equipo perforando es practicamente constante, no existe ningún factor que aumente o disminuya como consecuencia de las diferencias en el avance. En todo caso, al disminuir el rendimiento como consecuencia de exceso de dureza,

desprendimientos o pescas, los costes de combustibles y reparaciones pueden tender a incrementarse.

La estructura de este coste horario tiene aproximadamente la siguiente configuración:

<u>Costes directos</u>	<u>%</u>
Mano de obra .....	60-70
Combustible .....	6-8
Lubricantes .....	0,5-1
Mantenimiento .....	0,5-1
Cables .....	4-5
 <u>Costes indirectos</u>	
Amortizaciones .....	8-10
Reparaciones .....	5-6
Gasto vehículos auxiliares .....	4-5
Gastos generales .....	10-12

Dado que el coste horario es practicamente constante, el coste del metro perforado, depende del tiempo necesario para su perforación y este tiempo dependerá de factores intrínsecos al equipo (potencia, peso, calidad herramientas, capacitación personal, etc.) y de factores exógenos al equipo (naturaleza formaciones, profundidad, diámetro, etc.).

#### VIII) CRÍTICA DEL METODO: VENTAJAS E INCONVENIENTES

Desde el punto de vista técnico se trata de un método rudimentario, con elevadas pérdidas energéticas (en deformación elástica del cable, en trituración del detritus, etc.), con pérdidas de tiempo útil en el golpeo (no tiene circuito continuo de evacuación del detritus, siendo necesario parar, sacar la -

sarta y después proceder a la limpieza) y con avances muy lentos.

Por todas estas razones, desde hace muchos años se viene pronosticando su extinción. Sin embargo, la realidad española demuestra que los "agoreros" de este método están equivocados y muy posiblemente lo seguirán estando, al menos a medio plazo. En efecto, sobre un parque dedicado a la perforación de sondeos para agua de aproximadamente 1.030 equipos, del orden de 800 son de percusión. En metros de sondeo perforados en España para agua algo más del 50% son perforados a percusión. En formaciones detríticas y en sondeos de pequeño diámetro en formaciones consolidadas, este método está progresivamente retrocediendo en favor de la rotación a circulación <sup>directa</sup> ~~directa~~ y de la rotopercusión respectivamente, que son métodos técnicamente más avanzados y en condiciones de gastos generales semejantes son más competitivos.

Existen dos supuestos, en los que este método es insustituible: La perforación en formaciones detríticas groseras (terrazas) y la perforación a gran diámetro y profundidad en formaciones consolidadas, supuestos éstos, que desde el punto de vista técnico/económico, no están resueltos ni por la rotación ni por la rotopercusión.

PERFORACION A ROTOR EREUSION

JESUS CANDIL GONZALO  
Ingeniero de Minas  
Instituto Geológico y Minero de España

## I N D I C E

- I. INTRODUCCION
- II. EQUIPO DE PERFORACION
- III. LA SARTA DE PERFORACION
- IV. EL FLUIDO DE PERFORACION
- V. PROBLEMAS MAS FRECUENTES EN LA PERFORACION Y SU TRATAMIENTO
- VI. FORMACIONES MAS ADECUADAS PARA EL METODO
- VII. CONSIDERACIONES ECONOMICAS
- VIII CRITICA DEL METODO: VENTAJAS E INCONVENIENTES

## I. INTRODUCCION

El origen del método podemos encontrarlo en la perforación barrena golpeada en culata por un mazo accionado por un operario, mientras el giro tras cada golpe era provocado por la acción de un segundo operario.

Mediante este rudimentario sistema se conseguían los dos efectos que utiliza el método para su acción rompedora: percusión y rotación.

La evacuación del detritus, se realizaba periódicamente mediante limpieza del fondo del barreno con cuchara.

La aparición del martillo neumático, supone un avance extraordinario en la perforación de barreno. El aporte energético humano es sustituido por el aire a presión. La evacuación periódica, pasa a ser continua, la frecuencia del golpeo se incrementa extraordinariamente y los avances se tornan espectaculares. El martillo actuaba desde la superficie transmitiendo el golpe y la rotación a través de la barrena. La evacuación del detritus se realizaba mediante el barrido del aire y bajaba hasta el fondo por el interior de la barrena y retornaba por el espacio anular existente entre barrena y roca.

El planteamiento de alcanzar profundidades y diámetros mayores genera la técnica del martillo en fondo. El martillo que actuaba desde la superficie, en este sistema, situado en el fondo del barreno avanza a medida que progresa la perforación y está conectado a la superficie mediante una tubería por cuyo interior se inyecta el aire.

Sucesivos avances tecnológicos hacen que esta técnica que nace asociada a la perforación en canteras, se presente hoy con una fuerza extraordinaria en la perforación de sondeos para captación de agua subte—

rránea.

El esquema de funcionamiento de un equipo de rotopercusión para la realización de sondeos, básicamente consiste en un flujo de aire a presión que bajando por el interior de un varillaje actúa sobre el martillo, barre el fondo del sondeo y en un ascenso por el anular existente entre varillaje y pared del sondeo, arrastra el detritus hasta la superficie. A la vez que percute, el martillo gira en el fondeo del sondeo arrastrado por el giro que una cabeza de rotación le transmite a través de un varillaje al que está unido mediante rosca.



## II. EQUIPO DE PERFORACION

El equipo completo va montado sobre camión y los componentes más importantes son los siguientes:

El compresor: Es el elemento más importante de un equipo de - rotoperforación. Cuanto mayor caudal y presión sea capaz de aportar las posibilidades en profundidad y diámetro de la perforación aumentarán.

La cabeza de rotación: Es la encargada de producir el giro - del varillaje, la cabeza se desliza a lo largo del mastil, con recorrido suficiente para meter o sacar la varilla de perforación.

Sistema de empuje y extracción: Producido hidráulicamente y que se transmite a la cabeza de rotación.

Motor diesel: Refrigerado por aire que proporciona el accionamiento de las bombas hidráulicas.

Mastil: Elevable y abatible.

Cabrestantes hidráulicos:

Bomba para espumante:

Panel de mandos:

El equipo, puede trabajar si fuera necesario, a rotación con circulación directa, utilizando tricono y actuando al aire a alta presión como fluido de perforación.

### III. LA SARTA DE PERFORACION

Los elementos que componen la sarta son los siguientes:

- . Martillo con adaptador roscado
- . Centralizador
- . Varillaje con rosca API, macho en la parte superior y hembra en la inferior.
- . Adaptadores o conexiones roscadas a la cabeza.

La relación entre el diámetro del varillaje y diámetro de la perforación tiene una extraordinaria importancia a la hora de definir las características del compresor o viceversa, dadas las características del compresor viene determinada la relación óptima entre diámetro del varillaje y diámetro de perforación (ver diagrama adjunto).

Hay que lubricar el martillo con un aceite especial, alta potencia de película lubricante, buena adhesión, viscosidad estable y - alto punto de encendido. Al finalizar la perforación, tras interrumpir la inyección del agua, siempre se deberá hacer funcionar el equipo durante algunos minutos para permitir que el aceite de lubricación limpie el martillo de la humedad residual y cubra las piezas a fin de evitar la corrosión. En superficie se limpiará por soplado de aire. Finalizada la perforación se sacará lo antes posible el martillo, no debiendo dejar nunca el martillo en un sondeo con lodo. Es conveniente utilizar protectores de rosca, durante los transportes del varillaje.

Otros elementos en casos específicos de la sarta son:

- . Ensanchadores. Una vez realizado el sondeo piloto a pequeño diámetro, a veces, es necesario aumentar el diámetro, para esta -

operación se utilizan estos elementos llamados genéricamente ensanchadores.

. Triconos. Cuando se decie perforar a rotación con circulación directa con aire a presión.

#### IV. EL FLUIDO DE PERFORACION

Como fluido de perforación se utiliza el aire a alta presión y las funciones que realiza son las siguientes:

- . Accionar el martillo.
- . Refrigerar la boca del martillo.
- . Barrido del detritus.
- . Evacuación a superficie del detritus.

Los dos parámetros fundamentales son la presión y el caudal , su cuantía dependerá de:

Presión: La necesaria para que el martillo funcione en régimen normal más la presión para vencer la contrapresión que actúa sobre el martillo como consecuencia de la columna de agua que pudiera existir entre el varillaje y la pared del sondeo.

Caudal: Es necesario para provocarse una velocidad ascensional (por el anular existente entre varillaje y pared del sondeo), capaz de arrastrar el detritus a superficie.

La velocidad que se precisa depende fundamentalmente del tamaño del detritus y de su densidad.

Evidentemente, fijada la velocidad ascensional el caudal será función de la superficie de la sección anular existente entre el varillaje y la pared del sondeo. Esta superficie es función pues del diámetro del varillaje y del diámetro de la boca del martillo y en definitiva se concluye que existe una dependencia de signo contrario entre el caudal de aire y la relación diámetro del varillaje/diámetro de la boca del martillo.

Otra forma de incidir sobre el caudal de aire necesario, es actuando sobre la velocidad ascensional requerida para la evacuación del detritus. Para tal efecto se utilizan los llamados espumantes.

El espumante es un producto biodegradable, que actúa como "flotador" de tal modo que el conjunto grano+burbujas adheridas, tiene una densidad inferior a la densidad del grano considerado aisladamente. Como la densidad era uno de los factores de los que dependía la velocidad de evacuación, siendo la relación de dependencia del mismo signo -a mayor densidad, mayor velocidad-, al rebajar la densidad, se disminuye la velocidad necesaria para la evacuación y por consiguiente se puede trabajar con un caudal de aire menor.

Si se perfora en seco, o bien, el aporte de agua de la formación es muy pequeño, es conveniente inyectar agua a través del circuito del aire, tiene por finalidad la protección al personal de los efectos nocivos del polvo.

## V. PROBLEMAS MAS FRECUENTES EN LA PERFORACION Y SU TRATAMIENTO

- a) Pérdida de verticalidad.
- b) Inestabilidad de paredes.
- c) Pérdida de circulación.
- d) Exceso de contrapresión.

### a) Pérdida de verticalidad

En rotopercusión cuando la pérdida de verticalidad no permite la entubación del tramo necesario para cámara de bombeo, la solución más barata es la repetición integra del sondeo. Si el sondeo es de investigación hidrogeológica, la pérdida de verticalidad no suele impedir los objetivos del sondeo. Los factores que inciden favoreciendo la desviación son: buzamiento y estratificación de la formación.

### b) Inestabilidad de paredes

La inestabilidad de las paredes se combatirá añadiendo al circuito del aire una serie de productos químicos que genéricamente denominamos "polimeros". Actúan formando una película o costra a lo largo de toda la pared del sondeo que impide los desprendimientos. Sin con "poliméricos" no se resuelve la situación, la única posibilidad de seguir perforando a rotopercusión, es entubando y continuar la menor diámetro. Otra alternativa sería cambiar el martillo por tricono y continuar con un lodo adecuado a rotación directa.

### c) Pérdida de circulación

Este fenómeno suele estar asociado a formaciones karstificadas o bien a formaciones que presentan fisuración.

En estos supuestos, la corriente de aire+detritus, que asciende

de por el anular exterior al varillaje, en lugar de seguir una trayectoria vertical hasta la superficie, penetra por las fisuras o cavernas de la formación impidiendo así la obtención en superficie del detritus.

Cuando la fisuración o karstificación permite la entrada del aire+detritus al interior de la formación, la perforación puede proseguir. Cuando solamente permite la entrada del aire y no la del detritus la perforación no puede continuar.

Para continuar avanzando en este caso, se requiere el sellado previo de la zona de "fuga", bien cementando, bien entubando.

d) Exceso de contrapresión

La presión de trabajo será la necesaria para accionar el martillo más la necesaria para vencer la contrapresión que actúa sobre el martillo como consecuencia de la columna de agua que pudiera existir en el anular exterior al varillaje. Si la presión que proporciona el compresor no es suficiente para atender a ambas necesidades, se intentará reducir la contrapresión mediante espumantes. Si los espumantes no resuelven el problema, la perforación no podrá proseguir a rotopercusión. Se puede sustituir el martillo por tricono y continuar a rotación, aprovechando toda la presión que proporciona el compresor para vencer la contrapresión y arrastrar el detritus a superficie.

## VI. FORMACIONES MAS ADECUADAS PARA EL METODO

Las formaciones más adecuadas para este método son las formaciones consolidadas y que puede considerarse de dureza media, dura y muy dura.

Se perforan con gran facilidad calizas, dolomías, pizarras, margas-calcareas y areniscas.

En formaciones muy duras tales como cuarcitas, granitos y basaltos es en captación de agua el único método a seguir. Teniendo en cuenta que los caudales que se pueden encontrar en estas formaciones son generalmente bajos no se precisa para su extracción sondeos de gran diámetro, lo que significa que con rotoperCUSión se pueden realizar sondeos de diámetro suficiente para extraer todo el caudal que estas formaciones sean capaces de aportar.



## VII. CONSIDERACIONES ECONOMICAS

La maquinaria y elementos que componen un equipo de rotoperusión para realizar sondeos, son muy caros. Los consumos de combustibles son muy elevados. Teniendo en cuenta estas consideraciones, se comprende la necesidad de obtener altos rendimientos para hacer económicamente rentable el procedimiento.

Para la obtención de un rendimiento global elevado se deberán cumplir los siguientes requisitos:

1. Acondicionar bien el equipo, llevando todos los materiales necesarios para las perforaciones.
2. Efectuar una programación adecuada de los distintos trabajos, para evitar viajes inútiles.
3. Elevar el rendimiento de la perforación al máximo, con un buen estudio de cada perforación a realizar.
4. Llevar un mantenimiento adecuado, que evite en todo lo posible las averías.
5. Llevar un control de todos los consumos, niveles y horas de trabajo de cada uno de los elementos.
6. Evitar los tiempos muertos para que las horas de parada o inactividad sean mínimas.
7. Pedir con tiempo suficiente al almacén los materiales que hayn de ser necesitados. No se puede parar por falta de algún material.

A modo orientativo, la distribución de coste por metro expresada en tanto por ciento tiene un perfil aproximado al siguiente:

. Mano de obra incluida S.S. ....	20%
. Combustibles y lubricantes ....	30%
. Amortizaciones y reparaciones ....	25%
. Transporte, maquinaria y personal.	15%
. Montaje, desmontaje y aditivos ...	10%

### VIII. CRITICA DEL METODO: VENTAJAS E INCONVENIENTES

En formaciones consolidadas este método tiene un porvenir extraordinario, irá progresivamente desplazando a la percusión. Su punto débil está en la dificultad de perforar a gran diámetro en condiciones económicas competitivas.

La introducción en España de este método para la perforación de sondeos de captación de agua subterránea es muy reciente y en la actualidad se dedica a esta actividad aproximadamente unos 100 equipos que vienen a perforar del orden de 300.000 m. al año.

Este sistema es el único que permite perforar en condiciones económicas aceptables formaciones muy duras (cuarcitas, granitos y ba saltos).

Es un método muy rápido. Los equipos grandes pueden sacar una media (incluyendo traslados, entubaciones, etc.) de unos 500 m/mes, - aunque puede alcanzar avances del orden de 100 m./día.

Otra posibilidad que ofrece el método, es la realización de un sondeo de pequeño diámetro para investigación previa y en caso positivo, proceder a su ensanche.

El método no es apropiado para la perforación en formaciones no consolidadas por dos razones:

1. Por las dificultades de la propia perforación.
2. En formaciones no consolidadas (detríticas), el acabado del pozo exige un macizo filtrante entre pared de sondeo y tubería. Dado que con este método no se pueden obtener diámetros grandes, la exigencia anterior, implicaría un entubado de un diámetro insuficiente para cámara de bombeo.